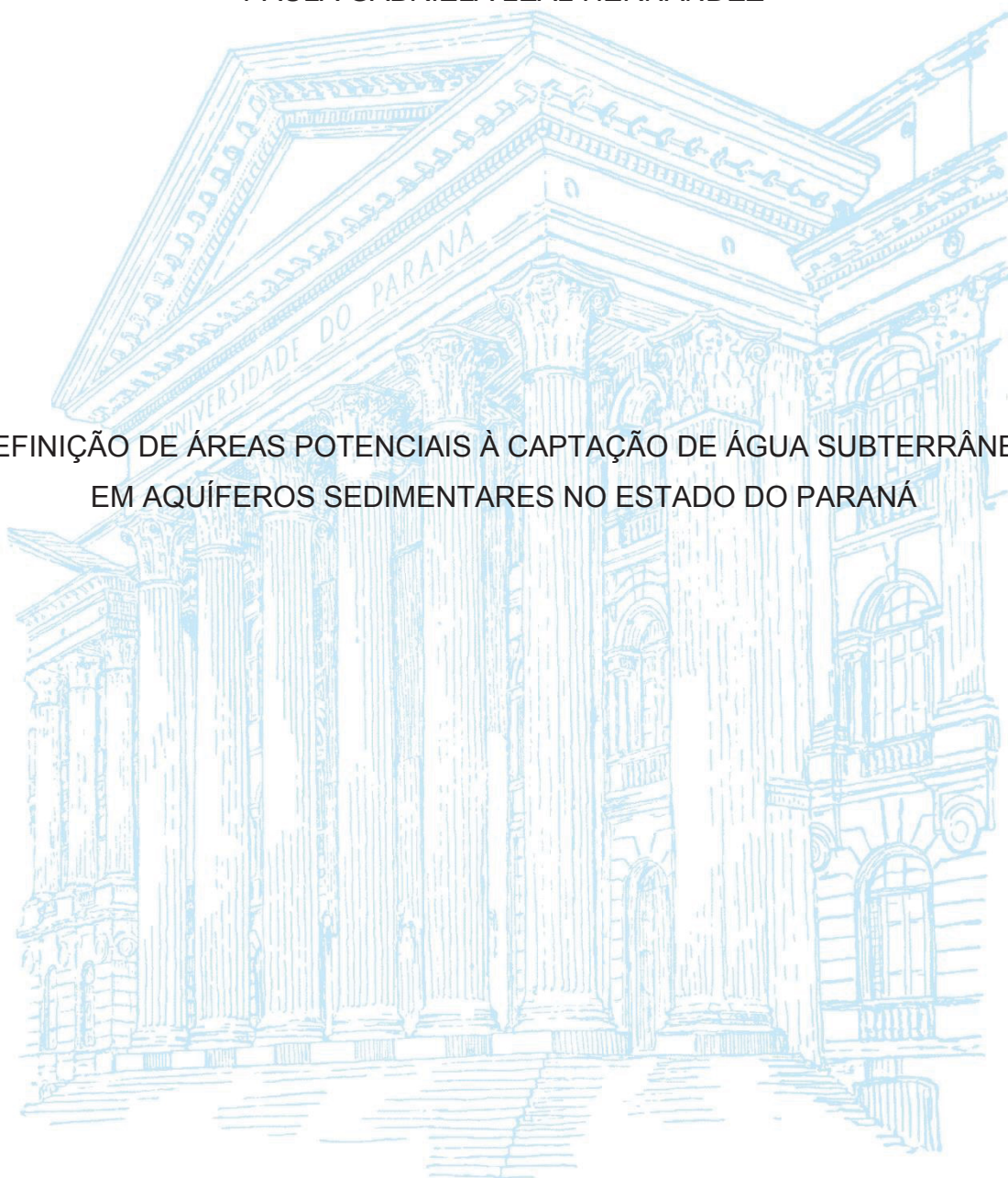


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULA GABRIELA LEAL HERNANDEZ

DEFINIÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS À CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA
EM AQUÍFEROS SEDIMENTARES NO ESTADO DO PARANÁ



CURITIBA

2019

PAULA GABRIELA LEAL HERNANDEZ

DEFINIÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS À CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA
EM AQUÍFEROS SEDIMENTARES NO ESTADO DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

H557d

Hernandez, Paula Gabriela Leal

Definição de áreas potenciais à captação de água subterrânea em aquíferos sedimentares no estado do Paraná [recurso eletrônico] / Paula Gabriela Leal Hernandez. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2019.

Orientador: Gustavo Barbosa Athayde .

1. Hidrogeologia - Paraná. 2. Interpolação. 3. Paraná, Rio, Bacia. 4. Bacias (Geologia) - Bauru. I. Universidade Federal do Paraná. II. Athayde, Gustavo Barbosa. III. Título.

CDD: 551.4908162

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



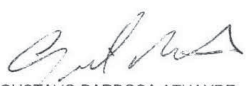
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -
40001016028P5

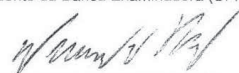
TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **PAULA GABRIELA LEAL HERNANDEZ** intitulada: **DEFINIÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS À CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AQUIFEROS SEDIMENTARES NO ESTADO DO PARANÁ**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Março de 2019.


GUSTAVO BARBOSA ATHAYDE
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


EDUARDO VEDOR DE PAULA
Avaliador Externo (UFPR)


DANIEL FABIAN BETTÚ
Avaliador Externo (UDESC)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Programa de Pós-Graduação Geologia e ao Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH) pela infraestrutura e oportunidade de realizar essa pesquisa de mestrado, bem como o secretário da Pós-Graduação em Geologia, Kazu, pela eficiência e por estar sempre disposto a ajudar. Agradeço à CAPES-DS pela bolsa concedida durante o mestrado.

Essa dissertação de mestrado só pôde ser desenvolvida e concluída devido ao apoio de diversas pessoas às quais dedico esse agradecimento.

Agradeço o meu orientador Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde pela paciência e dedicação, e por todas as discussões e orientações dadas para a evolução dessa pesquisa, além de todo o apoio para enfrentar os contratempos ao final do mestrado.

Agradeço a Prof^a. Dr^a. Camila de Vasconcelos Müller Athayde por me orientar no estágio à docência e por contribuir nas discussões dessa pesquisa desde o projeto inicial.

Agradeço as correções e sugestões para o desenvolvimento dessa pesquisa e contribuições incorporadas nos artigos decorrentes dessa dissertação dos professores: Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato, Dr. Otávio Augusto Boni Licht, Dr. Daniel Fabian Bettú e Dr. Eduardo Vedor de Paula.

Agradeço aos meus pais Paulo e Maria Cecília (*in memoriam*) e ao meu irmão e geólogo Pedro, minha família mais que amada e que são a minha base por todo apoio e amor dados. Minhas conquistas são também de vocês.

E agradeço ao meu companheiro de vida e da geologia, Alexandre Millen de Castro. Por todos esses anos de parceria, paciência, amor e por sempre me incentivar quando eu achava que não conseguiria. Que nós sigamos crescendo com as discussões geológicas e da vida!

RESUMO

Com as crescentes discussões sobre a gestão dos recursos hídricos, o aprimoramento dos conceitos vem evoluindo de uma gestão de crise para uma gestão de riscos, para que seja possível prever cenários problemáticos relacionados a estes recursos. Porém, há a dificuldade em se obter informações de subsuperfície dos recursos hídricos devido aos diversos fatores que interferem na sua ocorrência e disponibilidade, e com o avanço tecnológico há a possibilidade de integração de informações hidrogeológicas, a fim de definir regiões de maior potencialidade hídrica. O objetivo dessa pesquisa é o de elaborar um método de análise de dados hidrogeológicos em ambiente computacional, visando delimitar áreas potenciais à captação de água subterrânea em aquíferos sedimentares no estado do Paraná. Para tal, foram utilizados dados de poços tubulares profundos que apresentavam os parâmetros de capacidade específica, condutividade hidráulica, espessura saturada, nível estático, transmissividade, vazão e parâmetros físico-químicos dos aquíferos: Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani e Caiuá. Os métodos empregados envolveram a análise estatística do banco de dados; aplicação do método índice relativo de risco; interpolação de parâmetros hidrogeológicos para determinação do interpolador mais adequado ao banco de dados; hierarquização de parâmetros hidrogeológicos para atribuição de pesos de acordo com a relevância ao objetivo; e álgebra de mapas com a elaboração de um método de multiplicação de parâmetros hidrogeológicos para definição de áreas potenciais à captação de água subterrânea. Os resultados obtidos permitiram conhecer o comportamento estatístico dos dados em cada aquífero, bem como regiões com elevado risco toxicológico. Ainda foi possível determinar o interpolador Inverso da Distância Ponderada como método que apresentou valores estimados mais próximos dos valores medidos. Além da elaboração de um método que utilize os parâmetros hidrogeológicos e geoprocessamento na definição de áreas potenciais (alvos exploratórios) em aquíferos sedimentares. Os aquíferos Caiuá e Rio Bonito são dentre os estudados os que possuem maior extensão de alta a muito alta potencialidade em superfície. Enquanto que os aquíferos Passa Dois e Caiuá somam a maior extensão em superfície de baixo a moderado potencial. A demanda hídrica no estado é suprida pela disponibilidade hídrica superficial, no entanto se observa que em locais de baixa disponibilidade hídrica superficial o tipo de captação predominante para abastecimento é por meio do manancial subterrâneo. Ou quando há baixa disponibilidade hídrica subterrânea o tipo de captação predominante é por meio de água superficial. Tais informações podem ser usadas para o gerenciamento de águas subterrâneas e superficiais no estado do Paraná. Conhecer a distribuição espacial de diferentes parâmetros hidrogeológicos permite estimar áreas potenciais à ocorrência de água subterrânea e propicia também uma melhor gestão dos recursos, com a redução do risco exploratório, uma vez que serão conhecidas as áreas com maior ou menor potencial hidrogeológico mesmo em regiões onde há menor densidade de dados. O tratamento realizado contribui para diminuir a subjetividade na delimitação de áreas potenciais à captação de água subterrânea, visto que dados hidrogeológicos indicam diretamente a potencialidade e qualidade da água subterrânea.

Palavras-chave: Álgebra de mapas. Interpolação. Potencialidade hídrica. Bacia do Paraná. Bacia Bauru.

ABSTRACT

The increasing discussions on the management of water resources, the improvement of concepts have evolved from crisis management to risk management so that it is possible to predict problematic scenarios related to these resources. However, it is difficult to obtain subsurface information from water resources due to the various factors that interfere with its occurrence and availability. The technological advance allows the possibility of integrating hydrogeological information in order to define regions with greater water potential. The objective of this research is to elaborate a method of hydrogeological data analysis in computational environment aiming to delimit potential areas for the catchment of groundwater in sedimentary aquifers in the state of Paraná. For this purpose, data from deep tubular wells that had the parameters of specific capacity, hydraulic conductivity, saturated thickness, static level, transmissivity, flow rate and physicochemical parameters of the aquifers were used: Furnas, Itararé, Bonito River, Passa Dois, Guarani, and Caiuá. The methods employed involved the statistical analysis of the database; application of the relative risk index method; interpolation of hydrogeological parameters to determine the most appropriate interpolator in the database; hierarchy of hydrogeological parameters to assign weights according to the relevance to the objective; and map algebra with the elaboration of a method of multiplication of hydrogeological parameters to define potential areas for the catchment of groundwater. The results obtained allowed to know the statistical behavior of the data in each aquifer, as well as regions with high toxicological risk. It was still possible to determine the Inverse Interpolator of the Weighted Distance as a method that presented estimated values closer to the measured values. Besides the elaboration of a method that uses the hydrogeological parameters and geoprocessing in the definition of potential areas (exploratory targets) in sedimentary aquifers. The Caiuá and Rio Bonito aquifers are among those studied the ones with the greatest extension from high to very high surface potential. While the Passa Dois and Caiuá aquifers add up to the greatest extent on low to moderate potential surface. The water demand in the state is supplied by the superficial water availability, however, it is observed that in places of low surface water availability the type of catchment predominant to supply is through the underground spring. Or when there is low underground water availability the predominant type of catchment is through surface water. Such information can be used for the management of groundwater and surface water in the state of Paraná. Knowing the spatial distribution of different hydrogeological parameters allows estimating potential areas for groundwater occurrence and also provides better management of resources, with the reduction of exploratory risk, since areas with a greater or lesser hydrogeological potential will be known even in regions where there is less data density. The treatment carried out contributes to decrease the subjectivity in the delimitation of potential areas to the catchment of groundwater, since hydrogeological data indicate directly the potentiality and quality of groundwater.

Keywords: Map algebra. Interpolation. Water potential. Basin of the Paraná. Bacia Bauru.

LISTA DE FIGURAS

Dissertação

Figura 1 - Quantitativos do potencial explotável por região hidrográfica em áreas de afloramento de aquíferos.	20
Figura 2 – Mapas de localização da área, com a localização das bacias sedimentares e principais lineamentos de ocorrência por Zalán et al. (1987), e as rochas que compõem os aquíferos em estudo no estado do Paraná.	27
Figura 3 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Furnas. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).	48
Figura 4 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Itararé. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).	50
Figura 5 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Rio Bonito. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).	52
Figura 6 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Passa Dois. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).	54
Figura 7 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Guarani. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).	56
Figura 8 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Caiuá. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).	58

Artigo 1

Figura A 1. Mapa de localização dos aquíferos e dos poços tubulares que foram utilizados no estudo.....	62
Figura A 2. Etapas para definir o método de interpolação mais adequado aos parâmetros hidrogeológicos.	64
Figura A 3. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) <i>Topo to Raster</i> , com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro capacidade específica do aquífero Caiuá.....	78
Figura A 4. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) <i>Topo to Raster</i> , com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro condutividade hidráulica do aquífero Caiuá.....	79
Figura A 5. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) <i>Topo to Raster</i> , com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro espessura saturada do aquífero Caiuá.....	80
Figura A 6. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) <i>Topo to Raster</i> , com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro nível estático do aquífero Caiuá.	81
Figura A 7. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) <i>Topo to Raster</i> , com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro transmissividade do aquífero Caiuá.	82
Figura A 8. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) <i>Topo to Raster</i> , com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do	

mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro vazão do aquífero Caiuá.	83
Figura A 9. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) <i>Topo to Raster</i> , com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro índice relativo de risco do aquífero Caiuá.	84

Artigo 2

Figure B 1 - Map of the location of the aquifers under study.....	92
Figure B 2 - Flowchart of the steps for definition the groundwater potential zones... 94	
Figure B 3 - Map of groundwater potential areas of the aquifers studied in the state of Paraná.	99
Figure B 4 - Map of groundwater potential areas in the Caiuá aquifer and SIAGAS database wells.	100
Figure B 5 - Map of groundwater potential areas in the Guarani aquifer and SIAGAS database wells.	102
Figure B 6 - Map of groundwater potential areas in the Passa Dois aquifer and SIAGAS database wells.....	103
Figure B 7 - Map of groundwater potential areas in the Rio Bonito aquifer and SIAGAS database wells.....	105
Figure B 8 - Map of groundwater potential areas in the Itararé aquifer and SIAGAS database wells.	107
Figure B 9 - Map of groundwater potential areas in the Furnas aquifer and SIAGAS database wells.	109
Figure B 10 - Map showing the types of water catchment by the municipality and the watersheds in the state of Paraná.	111

LISTA DE GRÁFICOS

Dissertação

Gráfico 1 - Gráfico box-plot do parâmetro capacidade específica de todos os aquíferos.	42
Gráfico 2 - Gráfico box-plot do parâmetro condutividade hidráulica de todos os aquíferos.	43
Gráfico 3 - Gráfico box-plot do parâmetro espessura saturada de todos os aquíferos.	44
Gráfico 4 - Gráfico box-plot do parâmetro nível estático de todos os aquíferos.	45
Gráfico 5 - Gráfico box-plot do parâmetro transmissividade de todos os aquíferos.	46
Gráfico 6 - Gráfico box-plot do parâmetro vazão de todos os aquíferos.	47

Artigo 1

Graph B 1 – A coverage area of the potentiality classes in percentage.	98
---	----

LISTA DE TABELAS

Dissertação

Tabela 1 - Número de poços, vazão outorgada, profundidades médias de poço e de nível estático nos diferentes tipos de uso da água subterrânea - outorgas vigentes.	21
Tabela 2 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Furnas.	48
Tabela 3 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Itararé.	50
Tabela 4 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Rio Bonito.....	52
Tabela 5 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Passa Dois.....	54
Tabela 6 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Guarani.	56
Tabela 7 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Caiuá.	58

Artigo 1

Tabela A 1. Parâmetros físico-químicos presentes no banco de dados e respectivos valores máximos permitidos da Portaria 2914/11 e Portaria de consolidação nº5/2017.	65
Tabela A 2. Aquíferos e principais parâmetros responsáveis pela não potabilidade.	69
Tabela A 3. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Furnas.	71
Tabela A 4. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Itararé.	72
Tabela A 5. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Rio Bonito.	73
Tabela A 6. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Passa Dois.....	74
Tabela A 7. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Guarani.	75
Tabela A 8. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Caiuá.	76

Artigo 2

Table B 1 - Table with the geological characteristics and flows of the aquifers under study.....	93
Table B 2 - Importance scale for attribution of weights of Saaty (1990).	94
Table B 3 - Random Consistency Index, where n is the number of variables in the process.....	95
Table B 4 - Matrix of comparison with the variables under study.	96
Table B 5 - Standard weights of each parameter according to Saaty's AHP method (1990).....	96
Table B 6 - Classification of potential areas and coverage area.....	97
Table B 7 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Caiuá.....	100
Table B 8 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Guarani. ...	102
Table B 9 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Passa Dois.	103
Table B 10 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Rio Bonito.	105
Table B 11 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Itararé.....	107
Table B 12 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Furnas.....	109

LISTA DE SIGLAS

AHP	–	Analytic Hierachy Process
ANA	–	Agência Nacional de Águas
GIS	–	Geographical Information System
GPZ	–	Groundwater Potential Zones
IDW	–	Inverse Distance Weighted
IRR	–	Índice Relativo de Risco
MLA	–	Maximum Location Accuracy
SANEPAR	–	Companhia de Saneamento do Paraná
SIAGAS	–	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	–	Sistemas de Informações Geográficas
SN	–	Scale Number
TIN	–	Triangular Irregular Network
VMP	–	Valores Máximos Permitidos
WLC	–	Weighted Linear Combination

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Estrutura da dissertação	18
1.2 Água subterrânea no estado do Paraná.....	18
1.2.1 Como se definem áreas potenciais à captação de água subterrânea?	22
1.3 Objetivos	26
1.4 Contexto geológico e hidrogeológico da área de estudo.....	26
1.4.1 Aquífero Furnas	30
1.4.2 Aquífero Itararé	32
1.4.3 Aquífero Rio Bonito	33
1.4.4 Aquífero Passa Dois	34
1.4.5 Aquífero Guarani.....	35
1.4.6 Aquífero Caiuá.....	37
2 BANCO DE DADOS	39
2.1 Cálculo dos parâmetros hidrogeológicos.....	39
2.2 Estatística dos dados hidrogeológicos.....	41
2.2.1 Aquífero Furnas	47
2.2.2 Aquífero Itararé	49
2.2.3 Aquífero Rio Bonito	51
2.2.4 Aquífero Passa Dois	53
2.2.5 Aquífero Guarani.....	55
2.2.6 Aquífero Caiuá.....	57
3. RESULTADOS.....	59
3.1 Espacialização de parâmetros hidrogeológicos de aquíferos sedimentares no estado do Paraná	59
3.1.1 Introdução	61
3.1.2 A área de estudo	61
3.1.2.1 Hidrogeologia da área	62
3.1.3 Material e Métodos.....	63
3.1.3.1 Índice Relativo de Risco	64

3.1.3.2 <i>Interpolação de dados hidrogeológicos</i>	66
3.1.3.3 <i>Análise da estimativa</i>	68
3.1.4 Resultados e discussão	69
3.1.5 Considerações finais	86
3.1.6 Agradecimentos	87
3.1.7 Referências	87
3.2 Analytic Hierarchy Process and map algebra for the definition of groundwater potential areas in sedimentary aquifers	90
3.2.1 Introduction	91
3.2.2 The study area	92
3.2.2.1 <i>Geology and hydrogeology in the study area</i>	92
3.2.3 Material and Methods	93
3.2.3.1 <i>Assignments of weights, Analytic Hierarchy Process, and Map Algebra</i>	94
3.2.4 Results and discussion	97
3.2.5 Conclusions	111
3.2.6 Acknowledgments	112
3.2.7 References	112
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
REFERÊNCIAS	117
APÊNDICE A – ACEITE DE PUBLICAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RESUMO EM EVENTO	122

1 INTRODUÇÃO

Estudos de potencialidade hídrica subterrânea têm sido desenvolvidos em trabalhos anteriores utilizando informações físicas de superfície, em especial a geologia, parâmetros morfométricos, cobertura vegetal e uso da terra, tipos de solo, por exemplo. Para validação dos resultados esses estudos têm utilizado parâmetros hidrogeológicos de poços tubulares profundos, buscando a comparação com os valores de capacidade específica quando disponíveis (FREITAS, 2000; OH et al., 2011; LEE et al., 2012; KUMAR et al., 2016). Atualmente, com a crescente demanda por recursos hídricos o número de poços tubulares tem aumentado e com isso a obtenção de informações da água em subsuperfície se torna mais fácil de ser adquirida. Utilizar os parâmetros hidrogeológicos, como capacidade específica, condutividade hidráulica, espessura saturada, nível estático, transmissividade, vazão e parâmetros físico-químicos, para definir áreas de potencialidade hídrica se torna possível devido a maior quantidade de informações disponível e contribui para a diminuição da subjetividade em estudos que utilizam dados de superfície para definir potencialidade em subsuperfície.

Neste trabalho foram estudados parâmetros hidrogeológicos de poços tubulares profundos com a utilização de métodos estatísticos, de risco toxicológico, análises multicritério e ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aplicados aos aquíferos sedimentares no estado do Paraná para definição de áreas de potencialidade hídrica para captação subterrânea. Através dessas etapas é possível a elaboração de uma rotina de tratamento de dados hidrogeológicos para determinar regiões de maior e menor favorabilidade hídrica, levando em consideração a hidrodinâmica e qualidade da água subterrânea. As técnicas aplicadas contribuíram para avaliação dos métodos de estimativa em regiões em que não estão disponíveis informações de poços tubulares profundos, além de apresentar a interação dos dados hidrogeológicos e sua relevância ao objetivo proposto.

1.1 Estrutura da dissertação

Essa dissertação é composta por quatro capítulos: introdução, apresentação do banco de dados, os resultados em formato de dois artigos e uma conclusão de todo o trabalho.

No capítulo Introdução são apresentados os motivos que levaram ao estudo, os objetivos, e o contexto geológico e hidrogeológico de cada aquífero estudado. No capítulo Banco de Dados é apresentada a fonte do material, quantidade de poços e estatística das variáveis em estudo em cada um dos aquíferos.

O primeiro artigo, **Espacialização de parâmetros hidrogeológicos de aquíferos sedimentares no estado do Paraná**, aborda a interpolação de dados hidrogeológicos de poços tubulares profundos, utilizando três métodos de estimativa em seis parâmetros hidrogeológicos e em seis aquíferos sedimentares no estado do Paraná, a fim de definir quais dos métodos gera superfícies mais próximas dos valores medidos em campo.

O segundo artigo, **Processo Analítico Hierárquico e álgebra de mapas para definição de áreas potenciais de água subterrânea**, é referente a elaboração de um método utilizando dados hidrogeológicos espacializados em superfície, mediante análise multicritério e álgebra de mapas, com o objetivo de definir áreas potenciais à captação de água subterrânea em aquíferos sedimentares no estado do Paraná.

Ao final é apresentada a conclusão do trabalho, integrando as considerações de cada um dos artigos. Os métodos e material utilizados em cada artigo são apresentados nos mesmos, bem como as referências utilizadas em cada um deles. As demais referências utilizadas ao longo da dissertação são apresentadas ao final desta, juntamente com o apêndice A de aceite de publicação de resumo e apresentação de trabalho no XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

1.2 Água subterrânea no estado do Paraná

Pesquisas e catalogação de informações sobre os recursos hídricos no Brasil tiveram início há quase 70 anos no Nordeste devido à escassez de água nessa região, porém as atividades eram realizadas sem a preocupação em avaliar e planejar o uso desses recursos (FEITOSA et al., 2008). Ao longo dos anos e

conforme ocorria a evolução tecnológica, estudos hidrogeológicos mais detalhados foram elaborados, o que facilitou a integração de informações destes recursos e o conhecimento que se tem hoje em relação aos aquíferos está mais desenvolvido e contribui para sua melhor gestão.

Desde 2009 a Agência Nacional de Águas (ANA) elabora relatórios anuais abordando a situação e gestão dos recursos hídricos, havendo ainda relatórios completos que abordam a conjuntura de informações dos recursos dos quatro anos anteriores. No último relatório de conjuntura da ANA de 2017 foi incluído o capítulo “Lições e Desafios”. Esse capítulo aborda a evolução do conhecimento dos recursos hídricos após a passagem por situações de crise e que estas situações propiciaram um conhecimento mais profundo do que se tinha, gerando a oportunidade de reelaborar os elementos do sistema para eventos futuros, evoluindo de uma gestão de crise para uma gestão de riscos com o aprimoramento de técnicas de gerenciamento (ANA, 2017).

As águas subterrâneas desempenham uma importante alternativa para o enfrentamento de crises hídricas, visto a sua capacidade de armazenamento e resiliência em longos períodos de estiagem (ANA, 2017). Com isso, o uso desses mananciais tem crescido ao longo dos últimos anos, trazendo a necessidade de se conhecer a sua ocorrência e disponibilidade. A disponibilidade da água subterrânea pode ser mais facilmente compreendida quando se conhece o seu volume e como ela ocorre no meio subterrâneo e essas informações podem ser obtidas através de parâmetros hidrogeológicos de poços tubulares profundos, sendo estas obras de engenharia para captação da água subterrânea. Com a crescente demanda de água subterrânea o número de informações dos aquíferos evoluiu, de modo que os dados disponíveis são relevantes para expansão do conhecimento que se tem sobre esse tema.

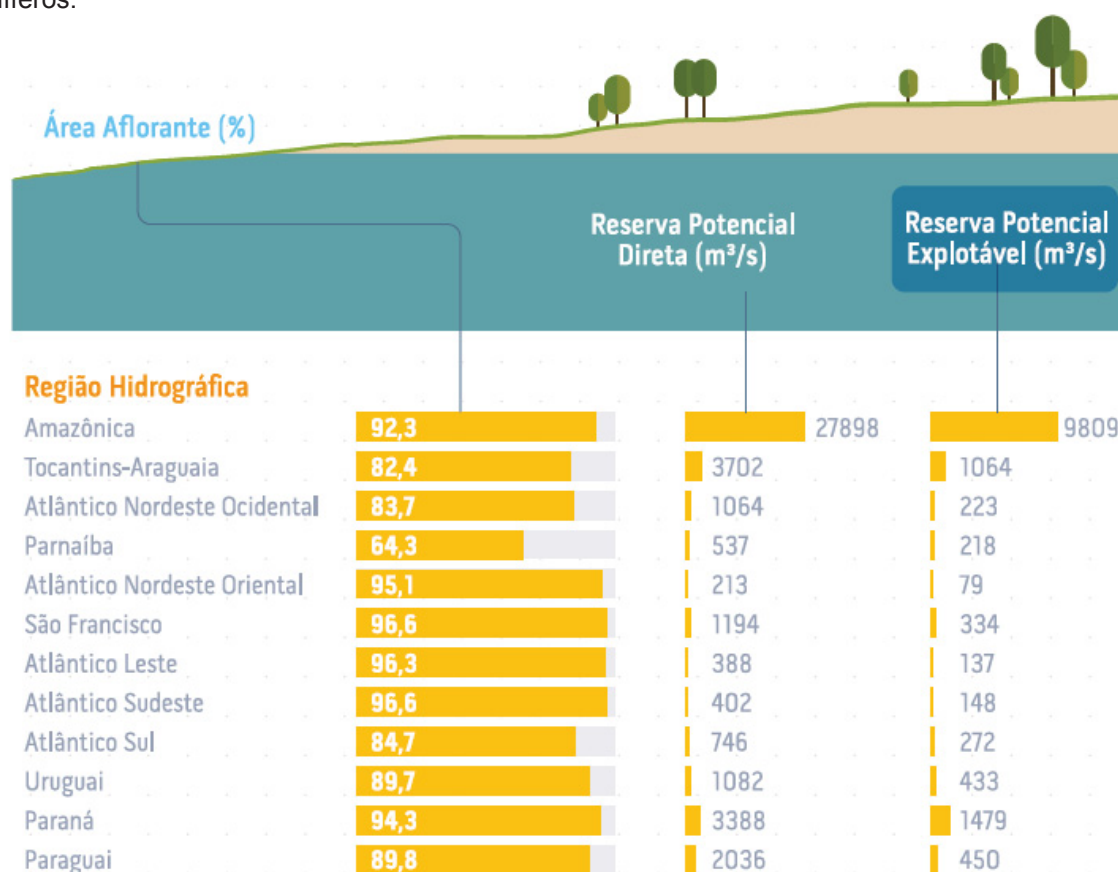
O maior potencial de recursos hídricos subterrâneos no Brasil está nas bacias sedimentares, que ocupam 48% do território brasileiro e correspondem a 90% da reserva total conhecida (FEITOSA et al., 2008; TUNDISI, 2014).

Mesmo nessas regiões, a disponibilidade hídrica não é uniforme, ocorrendo regiões de escassez e outras com relativa abundância, pois envolve uma série de fatores, tais como clima, geomorfologia e geologia local, por exemplo. Ao se tratar da disponibilidade hídrica, estão incluídas as águas superficiais e as águas

subterrâneas, sendo essa última uma importante alternativa em períodos de estiagem, além de manter o equilíbrio ecológico ao “alimentarem” os rios nesses períodos. O inverso também ocorre nas áreas de afloramento dos aquíferos, por meio da infiltração das chuvas e corpos d’água superficiais nas regiões hidrográficas (ANA, 2017).

As unidades aquíferas sedimentares em estudo estão localizadas na região hidrográfica do Paraná e possuem uma reserva potencial direta, aquela água que infiltra e efetivamente chega aos aquíferos, de $3388 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto que sua reserva potencial explorável, aquela em que a água pode ser explorada de forma sustentável, é de $1476 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figura 1). A região hidrográfica do Paraná engloba os estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Goiás, Santa Catarina e Distrito Federal, e apresenta grande importância no contexto nacional, pois representa a região de maior desenvolvimento econômico e de maior densidade populacional do país, além de possuir as maiores demandas por recursos hídricos com destaque para o uso industrial (ANA, 2014).

Figura 1 - Quantitativos do potencial explorável por região hidrográfica em áreas de afloramento de aquíferos.



Fonte: ANA (2017).

No estado do Paraná são necessários cerca de $51 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para atender a demanda hídrica (AGUASPARANA, 2010a), sendo que 42% desse total são voltados ao abastecimento público (Tabela 1).

Dos poços com outorgas vigentes (5807 poços), 60% das captações ocorrem no aquífero Serra Geral, 13.3% no aquífero Caiuá, 3.1% no aquífero Itararé, 2.5% no aquífero Furnas, 1.3% no aquífero Guarani, 1.0% no aquífero Passa Dois e 0.8% no aquífero Rio Bonito. No entanto, as maiores vazões médias outorgadas são no aquífero Guarani ($57.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), Rio Bonito ($25.4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), Furnas ($14,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), Caiuá ($11.8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), Itararé ($8.4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) e Passa Dois ($5.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) (BRASIL, 2015).

Tabela 1 - Número de poços, vazão outorgada, profundidades médias de poço e de nível estático nos diferentes tipos de uso da água subterrânea - outorgas vigentes.

Tipos de Uso	Nº de poços	nº de poços (%)	Soma das vazões outorgadas ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$)	Vazão total (%)	Vazão média ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$)	Profundidade média do poço (m)	Profundidade média do NE (m)
Agropecuária	1708	29.4%	10528.4	15.9%	6.2	129.6	43.4
Indústria	1253	21.6%	17940.1	27.0%	14.3	159.7	37.1
Saneamento	1115	19.2%	28423	42.8%	25.5	129.9	21.7
Comércio / Serviço	876	15.1%	4968.1	7.5%	5.7	140.3	39.2
Outros	737	12.7%	3603.1	5.4%	4.9	128.7	37.8
Administração Pública	118	2.0%	894	1.3%	7.6	142.9	30.8
Total / Média	5807	100.0%	66356.7	100.0%	11.4	138.5	35

Fonte: BRASIL (2015).

O Instituto de Águas do Paraná classifica a finalidade do uso das águas em cinco conjuntos: agropecuária, indústria, saneamento, comércio e serviço, administração pública e outros (envolve uma gama de possibilidades).

O uso das águas é determinado pela qualidade das mesmas, que é controlada por fatores naturais e por ação antrópica. Quando é controlada apenas por fatores naturais a composição da água reflete o caminho que percorre até o armazenamento, a interação com a rocha que a armazena e o tempo de residência no local. Já quando afetada por ação antrópica sua composição reflete também a substância química a que foi exposta e que pode ser de inúmeras fontes, tais como os agrotóxicos usados na agricultura, substâncias tóxicas usadas nas indústrias, entre outras fontes de contaminação de água subterrânea (ROSA FILHO et al., 2010).

No estado do Paraná as águas dos aquíferos são predominantemente classificadas como bicarbonatadas cálcicas, seguidas por águas bicarbonatadas sódicas, cálcio-magnesianas e cálcio-sódicas (BRASIL, 2015). Os aquíferos em estudo são principalmente classificados com águas bicarbonatadas cálcicas, sódicas e cálcio-magnesianas. A alcalinidade da água pode ser entendida como a capacidade da água de neutralizar ácidos e a predominância de bicarbonato ou carbonato depende do pH do meio. Esse parâmetro não apresenta problemas de toxicidade, no entanto, a presença de ânions e cátions, substâncias dissolvidas e parâmetros estéticos da água determinam a finalidade do uso da água (ROSA FILHO et al., 2010).

1.2.1 Como se definem áreas potenciais à captação de água subterrânea?

A água subterrânea ocorre abaixo do nível de saturação ou nível freático e está presente nas formações geológicas aflorantes e parcialmente saturadas, e nas formações geológicas profundas totalmente saturadas (FEITOSA et al., 2008). Para definição de quais locais são melhores para captação subterrânea é necessária a aplicação do conhecimento científico e experiência de profissionais.

A pesquisa em águas superficiais é mais rápida e barata, quando comparada à pesquisa em águas subterrâneas, cujo seu comportamento não é facilmente entendido, a pesquisa é mais lenta, dificilmente completa e cara. O comportamento do manancial subterrâneo evolui à medida que mais poços são perfurados, a cada nova medida, nova análise e relatórios apresentados. Os estudos de água subterrânea têm como objetivo principal a determinação de locais para captação de água subterrânea e iniciam com o levantamento do conhecimento disponível e que permita estabelecer o cronograma da pesquisa. São então organizados os dados disponíveis da área, que inclui: dados de poços, bases cartográficas e dados históricos (FEITOSA et al., 2008).

A elaboração de mapas geológicos e seções transversais em que se apresente a relação entre as rochas, o modo de ocorrência em subsuperfície e locais aflorantes em superfície também são etapas da pesquisa hidrogeológica. Seguindo para obtenção de informações de poços na região com relação às suas localizações, profundidades, volume de água bombeada, aquífero bombeado, dentre outras informações. Onde não há poços, é possível que seja necessário realizar

sondagens ou perfurações para se conhecer as características geológicas e aquíferas na área. As sondagens exploratórias são um modo eficaz de conhecer as características das formações geológicas, obtendo amostras e registrando um perfil geológico que revelam a natureza, profundidade e espessura das camadas geológicas. Os métodos geofísicos são bastante utilizados atualmente, visto que conseguem obter informações em uma escala 2D de subsuperfície, no entanto essas informações são indiretas e não determinam as características aquíferas, mas podem caracterizar o tipo de rocha e algumas de suas características (FEITOSA et al., 2008).

Dessa forma, os meios convencionais para definir áreas potenciais hidrogeológicas é feita a partir de métodos geofísicos e estudos geológicos e hidrogeológicos de campo. Porém, esses meios nem sempre são capazes de observar os variados fatores que controlam a ocorrência e movimento das águas subterrâneas (OH et al., 2011). Com isso, o sensoriamento remoto e o SIG têm se mostrado eficazes para uso em estudos hidrológicos e hidrogeológicos. A interpretação da água subterrânea através do sensoriamento remoto é realizada de acordo com informações da superfície registradas pelos satélites, tais como: fisiografia e estrutura geológica da superfície, distribuição e tipos da vegetação, características dos rios, tipos e umidade do solo, fontes, nascentes e outros. Essas informações da superfície são então processadas em programas de SIG que permitem a análise e representação espacial desses fenômenos.

O sensoriamento remoto e o SIG têm sido utilizados para delimitar áreas potenciais de água subterrânea, integrando mapas temáticos como alternativa aos métodos clássicos nos últimos anos. Diversos trabalhos têm aplicado essa junção de técnicas para definir áreas potenciais em aquíferos, especialmente os aquíferos cristalinos, onde os mapas temáticos refletem fatores que contribuem para a ocorrência da água subterrânea, tais como a geomorfologia, precipitação, geologia, densidade de lineamentos, cobertura vegetal e uso da terra, classe de solo, densidade de drenagem e a declividade do terreno. Alguns estudos têm dado a importância dos fatores de acordo com a opinião pessoal ou informações locais (AVTAR et al., 2010; MANAP et al., 2013), já outros estudos têm aplicado a análise multicritérios para hierarquizar essas informações (FREITAS, 2000; VIJITH, 2007;

RIBEIRO et al., 2010; OH et al., 2011; FASHAE et al., 2014; THILAGAVATHI et al., 2015; KUMAR et al., 2016).

Conhecer as áreas potenciais à captação de águas subterrâneas é importante para o planejamento destes recursos, visto que a água possui importância ambiental, devido a biodiversidade que sustenta; econômica, pela produção de bens de consumo; e social, por atender à necessidade básicas.

A definição de áreas potenciais aplicando análises multicritério e posterior álgebra de mapas tem sido realizada em aquíferos cristalinos por meio de fatores de superfície que influenciam as águas subterrâneas, tais como, geologia, geomorfologia e padrões de fraturamento. Os dados hidrogeológicos seriam utilizados nessas pesquisas para validar os resultados, pois estes indicam diretamente a potencialidade da água subterrânea. Por indicarem diretamente a potencialidade, estes podem ser os fatores aplicados para definição de áreas potenciais à captação de água subterrânea.

As análises multicritérios permitem combinar e avaliar diversas alternativas de acordo com vários critérios no auxílio a tomada de decisão. Elas partem da premissa de que os fatores que influenciam a tomada de decisão podem possuir maior ou menor relevância a depender do objetivo. As regras de decisão podem seguir uma abordagem multiobjetiva ou multiatributo, onde as técnicas multiobjetivas são orientadas a modelos matemáticos e as técnicas multiatributos (ou multicritério) assumem que o número de alternativas é dado explicitamente (MALCZEWSKI, 2004).

Nas últimas décadas vários métodos de tomada de decisão multicritério têm sido implementados em ambiente SIG, sendo um deles o método de *Weighted Linear Combination* (WLC) ou Combinação Linear Ponderada. O WLC foi utilizado por Vijith (2007) para hierarquizar parâmetros de superfície com maior relevância hidrogeológica em aquíferos fraturados. Esse método se baseia no conceito de média ponderada, com a atribuição de pesos de acordo com a importância ao objetivo, os quais são então multiplicados aos pesos, para ao final obter uma pontuação em cada alternativa possível, onde será escolhida a alternativa que possuir maior pontuação (MALCZEWSKI, 2004). O WLC é considerado um método simples e clássico na tomada de decisão, assim como o Modelo Booleano (MALCZEWSKI, 2004). Para aplicação do Modelo Booleano é necessário que os

atributos representem apenas duas classes, um padrão binário. Os atributos são então combinados seguindo uma sequência lógica que dará suporte à hipótese definida, sendo favoráveis ou não favoráveis à ela (MOREIRA et al., 2001). Freitas (2000) utiliza em seu trabalho o conceito do Modelo Booleano para definir atributos favoráveis e não favoráveis a áreas potenciais hidrogeológicas em aquíferos cristalinos.

Outro método que tem sido bastante aplicado é uma variação do WLC, denominado de *Analytic Hierarchy Process* (AHP) ou Processo Analítico Hierárquico. Ribeiro et al. (2010), Fashae et al. (2014) e Kumar et al. (2016) utilizaram o AHP para definir áreas potenciais em aquíferos cársticos, fraturados e de sedimentos inconsolidados. Esse método permite definir a importância entre critérios e se baseia na comparação dos mesmos e das alternativas possíveis, além de medir a consistência dos julgamentos¹ (MOREIRA et al., 2011).

Em estudos anteriores o método de análise multicritério variou de acordo com as escolhas dos autores e como exposto por Malczewski (2004) não é definido qual destes é mais adequado para cada situação. No geral, trabalhos que objetivavam a definição de áreas potenciais eram voltados à aquíferos cristalinos e alguns poucos à aquíferos cársticos e sedimentos inconsolidados, onde eram utilizados aspectos de superfície, tais como, geologia, geomorfologia, densidade de lineamentos, precipitação, declividade, classes de solo, cobertura vegetal e uso do solo e densidade de drenagem.

Dados hidrogeológicos, especialmente os dados de capacidade específica, são utilizados para validação do resultado em trabalhos de definição de áreas potenciais, ou quando não se tem os dados, são utilizados relatórios e trabalhos anteriores da área com informações de potencialidade.

A cada poço perfurado e a cada nova medida, mais características do aquífero são obtidas e essas informações devem ser utilizadas para aprimorar tanto o que se conhece no local de situação do poço como em escalas regionais. A proposta de hierarquizar dados hidrogeológicos com maior relevância à potencialidade hídrica para captação de água subterrânea contribuirá para estudos

¹ Avalia se os novos pesos atribuídos são coerentes analisando o índice de consistência e índice de consistência aleatório, por meio da relação de ambos, denominado relação de consistência. A relação de consistência se refere a magnitude de inconsistência e tem o valor máximo permitido de 10%.

em aquíferos sedimentares, no que diz respeito a investimento de recursos em áreas potenciais, reduzindo o risco exploratório e tornando sustentável o uso das águas subterrâneas.

1.3 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é elaborar um método de análise de dados hidrogeológicos em ambiente computacional, visando delimitar áreas potenciais à captação de água subterrânea em aquíferos sedimentares no estado do Paraná.

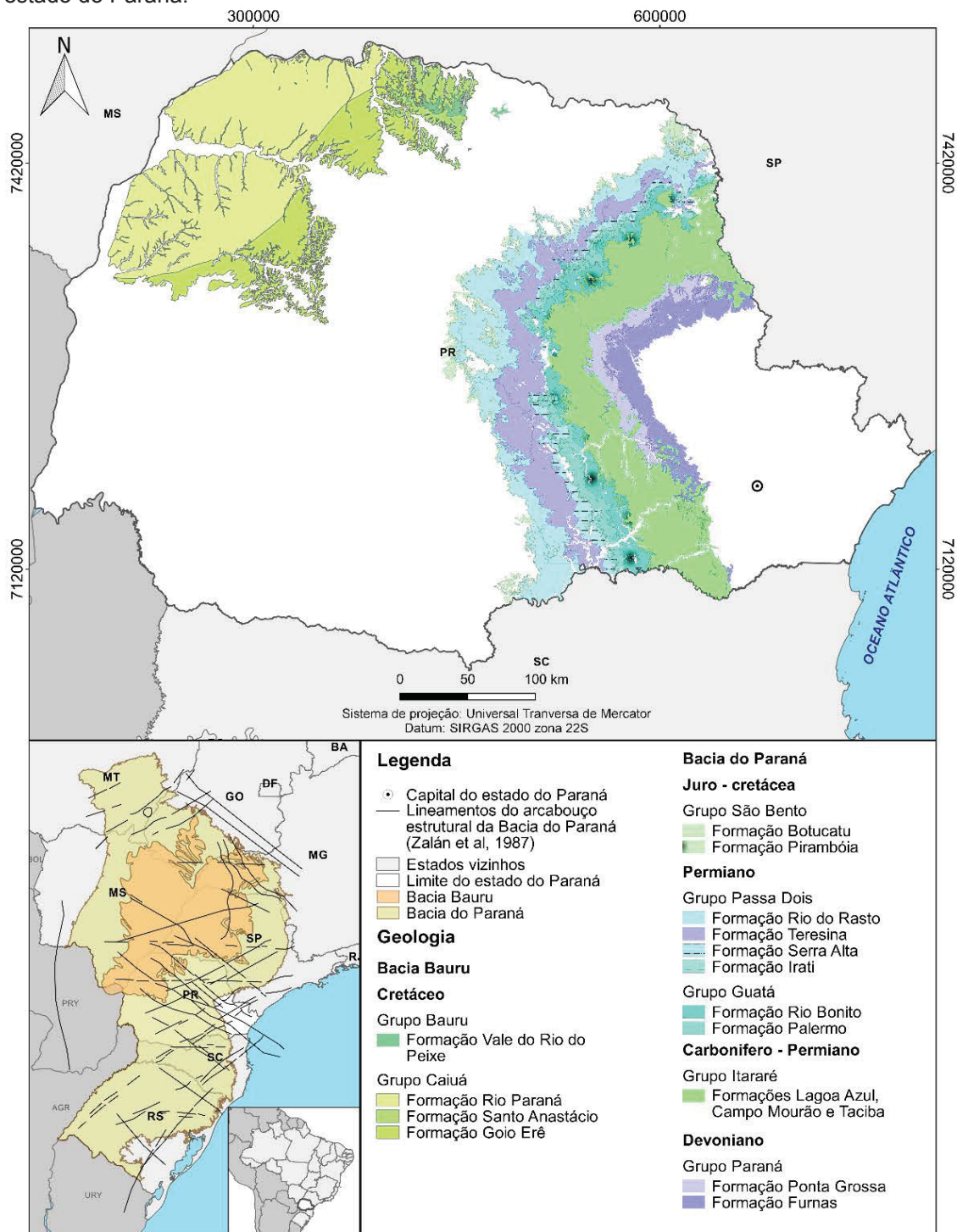
Para atingir o objetivo principal são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Análise estatística e avaliação dos métodos de interpolação quando aplicados aos dados hidrogeológicos, verificando o impacto gerado pelo processo de estimativa;
- Hierarquizar informações hidrogeológicas que tenham maior relevância na determinação de áreas potenciais, estabelecendo os parâmetros multiplicadores para o método de determinação de áreas potenciais na álgebra de mapas;
- Elaboração de mapas para os aquíferos estudados com a indicação de áreas mais favoráveis à captação de recursos hídricos subterrâneos.

1.4 Contexto geológico e hidrogeológico da área de estudo

A área de estudo compreende seis aquíferos sedimentares, que somados compreendem uma área de 64600 km² no estado do Paraná (Figura 2). Dentre os seis aquíferos, cinco incluem unidades geológicas da Bacia Sedimentar do Paraná, localizados na região centro-leste do estado, limitados a oeste pelo Serra Geral e a leste pelo embasamento cristalino: aquíferos Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois e Guarani, e que juntos afloram numa área de 39900 km². As rochas do aquífero Caiuá, pertencem as rochas da Bacia Bauru, localizadas a noroeste do estado, limitadas a noroeste pelo rio Paraná e a sudeste pela formação Serra Geral, aflorando em uma área de 24700 km².

Figura 2 – Mapas de localização da área, com a localização das bacias sedimentares e principais lineamentos de ocorrência por Zalán et al. (1987), e as rochas que compõem os aquíferos em estudo no estado do Paraná.



Fonte: modificado de BRASIL (2015) e FERNANDES; RIBEIRO (2015).

A evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná, referente ao período entre o Neo-Ordoviciano (~450Ma) e o Neocretáceo (~70 Ma), foi constituída de uma série de eventos de sedimentação, magmatismo e com presença de múltiplas

condições tectono-sedimentares (MILANI, 1997; MILANI, 2004). O embasamento desta bacia é constituído por rochas ígneas e metamórficas de idades arqueanas a proterozoicas, localmente cobertas por sequências vulcanossedimentares, sedimentares e de sedimentos inconsolidados (MILANI, 1997). Milani (1997) observou seis unidades sedimentares correspondentes ao empilhamento de sucessivas supersequências limitadas por discontinuidades entre si, sendo reconhecidas como: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo), sendo que as supersequências Rio Ivaí, Paraná e Gondwana I correspondem a grandes ciclos transgressivos-regressivos paleozoicos e as demais unidades representam unidades continentais mesozoicas com rochas ígneas associadas.

Após o vulcanismo Serra Geral, ocorrido durante o Cretáceo, houve mudanças significativas na evolução da Plataforma Sul-Americana e foram criadas novas condições de sedimentação, o que levou a acumulação de sedimentos em uma depressão com evolução geológica distinta da Bacia do Paraná na região centro-meridional dessa plataforma, denominada Bacia Bauru de idade neocretácea, e que é dividida nos grupos Caiuá e Bauru, o primeiro refletindo uma sedimentação em ambiente desértico e o segundo uma sedimentação em ambiente aluvial (FERNANDES, 1992; FERNANDES; COIMBRA, 1994).

São estudadas na presente pesquisa unidades dessas duas bacias sedimentares. A primeira, a Bacia do Paraná, é uma bacia intracratônica paleozoica que ocupa uma área total de 1500000 km² e se estende por quatro países na América Latina: Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai. Em território brasileiro a Bacia do Paraná ocupa uma área de 1000000 km² e ocorre nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso (SCHNEIDER et al., 1974; MILANI, 2004). Já a Bacia Bauru desenvolveu-se como bacia continental interior após a ruptura do continente gondwânico no centro da Plataforma Sul-Americana no Neocretáceo e ocupa uma área total de 370000 km² e no Brasil ocorre nos estados de Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás (FERNANDES; COIMBRA, 2000).

Essas duas bacias sedimentares abrigam sistemas aquíferos complexos, tidos como aquíferos porosos e que apresentam peculiaridades que por vezes os

fazem únicos em suas características. Os aquíferos que são alvos dessa pesquisa são os aquíferos Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani e Caiuá (Figura 2).

Aquíferos são formações geológicas capazes de armazenar e permeáveis o suficiente para permitir que a água se movimente, contudo algumas porções geológicas possuem menos permeabilidade devido a geologia local e essa baixa permeabilidade dá às formações as nomenclaturas de aquitarde e aquíclode, sendo ambas incapazes de ceder água de forma econômica por meio de obras de captação, porém o aquíclode é incapaz de transmitir água em condições naturais devido a permeabilidade muito baixa, e os aquíquardos embora possuam baixa permeabilidade, são capazes localmente de transmitir água como em um aquífero.

O Instituto Águas do Paraná classifica os principais aquíferos no estado do Paraná em: Pré-cambriano, Carste, Paleozoico Inferior, Paleozoico Médio-Superior, Guarani, Caiuá, Guabirotuba e Costeiro. Atualmente os aquíferos paleozoicos foram individualizados de acordo com as informações geológicas. O aquífero Paleozoico Inferior foi individualizado nos aquíferos Furnas e Ponta Grossa, o aquífero Paleozoico Médio-Superior foi individualizado nos aquíferos Itararé, Rio Bonito, Palermo e Passa Dois (BRASIL, 2015).

Com relação a geomorfologia, estão presentes três unidades morfoestruturais no estado do Paraná: Cinturão Orogênico do Atlântico, Bacia Sedimentar do Paraná e Bacias Sedimentares Cenozoicas e Depressões Tectônicas. A Bacia Sedimentar do Paraná é subdividida em cinco unidades morfoesculturais: Serra do Mar, Primeiro Planalto, Segundo Planalto, Terceiro Planalto e Planícies (OKA-FIORI; SANTOS, 2006).

No Segundo e Terceiro Planalto estão inseridos os aquíferos estudados nesse trabalho. O Segundo Planalto abrange uma área de aproximadamente 44000 km² no estado do Paraná, predominando o relevo plano a moderadamente ondulado em estruturas monoclinais, sub-horizontais, mergulhando para oeste, estando ainda esculpida em rochas paleozoicas. Os aquíferos encontrados nessa unidade geomorfológica são: Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois e Guarani. O Terceiro Planalto abrange uma área de aproximadamente 126000 km², cerca de 2/3 do estado do Paraná, e compreende um conjunto de relevos planálticos limitados pelos principais afluentes do rio Paraná, e o aquífero Caiuá é encontrado a noroeste deste planalto, limitado a norte pelo rio Paraná (OKA-FIORI; SANTOS, 2006). Os planaltos

são conjuntos de relevos planos e comumente localizados em altitudes elevadas, e limitados em pelo menos um dos lados por superfícies mais baixas, onde os processos erosivos superam os processos de sedimentação (IBGE, 2009). Esse aspecto propicia o transporte de sedimentos para as áreas mais baixas, favorecendo o surgimento de depressões e de planícies, além também de contribuir para o transporte de água de regiões mais altas para regiões mais baixas quando não ocorre a infiltração, favorecendo a recarga dos aquíferos.

1.4.1 Aquífero Furnas

O aquífero Furnas está localizado a leste do estado do Paraná no Segundo Planalto Paranaense (ITCG, 2008b), se estende por uma área de aproximadamente 4200 km² e aflora nas bacias hidrográficas: Itararé, Cinzas, Tibagi, Ribeira e Iguaçu, sendo que mais de 50% da região aflorante ocorre na bacia hidrográfica Tibagi (ITCG, 2010). O clima da região é predominantemente oceânico, mas ao norte ocorre o clima subtropical úmido (ITCG, 2008a). Os solos de ocorrência na região são argissolos, cambissolos, latossolos, e neossolos, sendo usados na maior parte da área para a agricultura, e ao norte o uso é para reflorestamento e pastagem (ITCG, 2008c; 2008d).

O aquífero Furnas ocorre nas rochas da formação Furnas, de idade devoniana, que pertence às rochas do grupo Paraná (PETRI, 1948) de idade devoniana e que corresponde à Supersequência Paraná (MILANI, 1997) na Bacia do Paraná, e é dividido nas formações Furnas e Ponta Grossa. O grupo Paraná apresenta uma espessura máxima de 800 m, sendo na base limitado por uma discordância angular com o grupo Ivaí e com as rochas do embasamento, e no topo é limitado por uma discordância erosiva com as unidades que a sucedem na estratigrafia (PETRI, 1948; MILANI et al., 2007).

A formação Furnas é composta por uma sucessão de arenitos quartzosos brancos, médios a grossos, caulínicos e alguns intervalos de pequena espessura de arenitos conglomeráticos, arenitos finos e siltitos argilosos micáceos, onde esse pacote exhibe estratificações cruzadas de várias naturezas (SCHNEIDER et al., 1974; MILANI et al., 2007). A formação Furnas possui espessura superior a 300 m em subsuperfície e até 200 m em superfície (SCHNEIDER et al., 1974). Petri (1948) descreveu camadas de transição entre as duas formações que foram validadas em

perfis de poços com o aumento da argilosidade, que evidencia uma passagem gradacional para a formação Ponta Grossa (MILANI et al., 2007). Essa unidade arenosa passa gradacionalmente para a formação Ponta Grossa, predominantemente pelítica e que representa a progressiva inundação da plataforma no Eodevoniano (MILANI, 1997). Para a formação Ponta Grossa foram constatadas espessuras que ultrapassam 600 m em subsuperfície e em superfície a espessura varia de 200 m a 300 m (SCHNEIDER et al., 1974; MILANI et al., 2007). Essa unidade é formada por folhelhos, folhelhos silticos e siltitos cinzentos, localmente carbonosos, fossilíferos, micáceos e com intercalações de arenitos muito finos, esbranquiçados, sendo a estrutura dominante nesse pacote a laminação plano-paralela (SCHNEIDER et al., 1974).

No aquífero Furnas a ocorrência de água subterrânea está associada mais às estruturas tectônicas do que sua porosidade primária, pois os arenitos dessa formação se encontram muito consolidados, enquanto que a formação Ponta Grossa, que é considerada não-aquífera ou pouco produtiva, funciona como camada confinante do aquífero Furnas (AGUASPARANÁ, 2010b). Dentre os 15 municípios localizados sobre este aquífero, apenas um capta água de forma exclusivamente subterrânea, sendo que em 73.3% dos municípios a captação ocorre de forma mista. A vazão mediana dos poços que captam água no aquífero Furnas é de $8.03 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com vazão mínima de $1.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ nos municípios de Tibagi, Ponta Grossa e Palmeira e vazão máxima de $175.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no município de Porto Amazonas (BRASIL, 2015). As águas do aquífero Furnas são de boa qualidade para consumo humano, segundo o AGUASPARANA (2010b) e são por eles classificadas como bicarbonatadas sódicas, enquanto que para BRASIL (2015) as águas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, seguidas por águas bicarbonatadas sódio-cálcicas e bicarbonatadas cálcio-sódicas. Em ambos os trabalhos o ferro total presente nas amostras de água se apresentou acima dos valores máximos permitidos, bem como o pH, cor e turbidez com valores elevados e que restringem o uso *in natura* da água, mas que podem ser facilmente corrigidos em estações de tratamento. (AGUASPARANA, 2010b; BRASIL, 2015).

1.4.2 Aquífero Itararé

O aquífero Itararé está localizado a leste do estado do Paraná, no Segundo Planalto Paranaense (ITCG, 2008b) e se estende por uma área de aproximadamente 14300 km² aflorando nas bacias hidrográficas: Itararé, Cinzas, Tibagi e Iguaçu (ITCG, 2010). O clima da região é predominantemente oceânico (ITCG, 2008a) e os solos de ocorrência são argissolos, cambissolos, latossolos, neossolos e nitossolos, sendo usados na maior parte da área para a agricultura e reflorestamento (ITCG, 2008c; 2008d).

O grupo Itararé está inserido na Supersequência Gondwana I de Milani (1997) na Bacia do Paraná e possui mais 1300 m de espessura e está em discordância erosiva com o grupo Paraná na base (SCHNEIDER et al., 1974). França e Potter (1988) propuseram que o grupo Itararé, de idade carbonífera-permiana, fosse dividido em subsuperfície nas formações Lagoa Azul, Campo Mourão, Taciba e Aquidauana.

Na base desse grupo se encontra a formação Lagoa Azul, composta por dois membros e que possui espessuras variando de 200 m a 400 m. O membro basal, denominado Membro Cuiabá, é uma porção mais arenosa e de baixa permeabilidade devido à sua intensa cimentação, e no topo, o membro Tarabaí, mais argiloso. Em seguida, a formação Campo Mourão apresenta uma unidade predominantemente arenosa, mas que também é composta por folhelho, siltito e lamito seixoso, e em grande parte da bacia a espessura varia de 400 m a 500 m. Finalizando este grupo no estado do Paraná está a formação Taciba, que é encontrada em regiões mais rasas da bacia e é composta por lamito seixoso, arenito, folhelho e siltito, e as espessuras normalmente são de 200 m a 300 m. No domínio setentrional da sinéclise é encontrada a formação Aquidauana que corresponde ao grupo Itararé, mas se diferencia do mesmo por causa de sua coloração avermelhada (FRANÇA; POTTER, 1988; MILANI et al., 2007).

O aquífero Itararé é um aquífero livre, mas que em certos níveis encontra-se confinado devido à própria litologia que varia lateralmente de arenitos a pelitos, além ainda de ocorrerem corpos de diabásio que propiciaram o comportamento isolado do aquífero (AGUASPARANA, 2010b; BRASIL, 2015). Dentre os 42 municípios localizados sobre este aquífero, 9 captam água superficial, 12 de água subterrânea,

um não se tem informações² e os demais municípios (47.62%) captam água de forma mista. A vazão mediana dos poços que captam água no aquífero Itararé é de $7.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com vazão mínima de $0.18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no município de Guatiguá e vazão máxima de $70.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no município de Lapa. As águas desse aquífero são de ótima qualidade para consumo humano e são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, seguidas por águas bicarbonatadas sódicas, porém análises em alguns poços indicaram valores acima do permitido de ferro total, fluoreto, manganês, turbidez, cor, sulfato e nitrito (AGUASPARANA, 2010b; BRASIL, 2015).

1.4.3 Aquífero Rio Bonito

O aquífero Rio Bonito está localizado no leste do estado do Paraná, no Segundo Planalto Paranaense (ITCG, 2008b) e se estende por uma área de aproximadamente 2500 km^2 e aflora nas bacias hidrográficas: Itararé, Cinzas, Tibagi e Iguaçu (ITCG, 2010). O clima da região é predominantemente oceânico (ITCG, 2008a) e com relação aos solos são encontrados: argissolos, cambissolos, latossolos, neossolos e nitossolos, sendo usados na maior parte da área para a agricultura e reflorestamento (ITCG, 2008c; 2008d).

O grupo Guatá, de idade permiana, está inserido na Supersequência Gondwana I de Milani (1997) na Bacia do Paraná e é constituído de siltitos cinzas, esverdeados e de arenitos com intercalações de camadas de carvão e folhelhos carbonosos, e é dividido nas formações Rio Bonito e Palermo (SCHNEIDER et al., 1974). A formação Rio Bonito é a unidade que está depositada logo acima do grupo Itararé e é composta da base para o topo por uma porção arenosa, seguida por uma porção argilosa e no topo por uma porção areno-argilosa, onde estão os principais leitos de carvão explorados na Bacia do Paraná (SCHNEIDER et al., 1974). Em superfície, a formação possui espessura de aproximadamente 300 m (BRASIL, 2015). A formação Palermo é constituída por argilitos, siltitos e siltitos arenosos, intensamente bioturbados e com estratificação cruzada de pequeno porte, quando preservadas (SCHNEIDER et al., 1974). Em superfície a espessura varia em cada estado, chegando a 150 m no estado do Rio Grande do Sul, 90 m nos estados de Paraná e Santa Catarina, e 50 m nos estados de Goiás, Mato Grosso e São Paulo,

² Não é atendido pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

mas em subsuperfície a maior espessura reconhecida foi de 282 m no Rio Grande do Sul (SCHNEIDER et al., 1974).

O aquífero Rio Bonito possui valores elevados de sulfatos na água devido à presença de pirita nos leitos de carvão da formação geológica. Dentre os 32 municípios localizados sobre este aquífero, 8 captam água exclusivamente água superficial, 7 exclusivamente subterrânea e os demais municípios (46.87%) captam água de forma mista. A vazão mediana dos poços que captam água no aquífero Rio Bonito é de $10.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com vazão mínima de $1.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e vazão máxima de $132.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (BRASIL, 2015). As águas desse aquífero são classificadas como bicarbonatadas sódicas, seguidas por águas bicarbonatadas cálcicas e cálcio-sódicas e contêm valores elevados de fluoretos, manganês, sódio e sólidos totais dissolvidos. Cabe ainda ressaltar o pH elevado que restringe o uso *in natura*, mas que pode ser facilmente corrigido em estações de tratamento (AGUASPARANA, 2010b; BRASIL, 2015).

1.4.4 Aquífero Passa Dois

O aquífero Passa Dois está localizado a leste do estado do Paraná, no Segundo Planalto Paranaense (ITCG, 2008b) e se estende por uma área de aproximadamente 16900 km^2 e aflora nas bacias hidrográficas: Itararé, Cinzas, Tibagi, Ivaí, Paranapanema I e Iguaçu (ITCG, 2010). O clima da região é predominantemente oceânico (ITCG, 2008a) e os solos de ocorrência na região são argissolos, cambissolos, latossolos, neossolos e nitossolos, sendo usados na maior parte da área para a agricultura, pastagem e campo (ITCG, 2008c; 2008d).

O grupo Passa Dois, de idade permiana, está inserido na Supersequência Gondwana I de Milani (1997) na Bacia do Paraná e pode ser dividido nas formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rastro (SCHNEIDER et al., 1974). A formação Irati é constituída por argilitos e folhelhos intercalados, de cores cinza-escuro a negro, pirobetuminosos e associados a níveis de calcários, bastante silicificados em superfície (BRASIL, 2015). Em superfície a unidade não ultrapassa 40 m e em subsuperfície chegou a até 71 m de espessura (SCHNEIDER et al., 1974). A formação Serra Alta é constituída por argilitos, folhelhos e siltitos cinza-escuros a negros, contendo lentes e concreções calcíferas com estratificação plano-paralela (BRASIL, 2015). Em superfície a unidade possui espessura entre 80 m a 90 m nos

estados do Paraná e Santa Catarina (SCHNEIDER et al., 1974). A formação Teresina é constituída por uma alternância de argilitos e folhelhos com siltitos e arenitos muito finos acimentados com intercalações de calcário micrítico e estromatolítico (BRASIL, 2015). Em superfície, o pacote possui 300 m de espessura aproximadamente e em subsuperfície a maior espessura encontrada foi de 318 m (SCHNEIDER et al., 1974; BRASIL, 2015). A formação Rio do Rastro foi depositada em dois contextos de deposição. No primeiro, os siltitos e argilitos avermelhados e arenitos finos intercalados foram depositados em ambiente fluvial e de planície deltaica, e no segundo, siltitos e arenitos esverdeados muito finos, micríticos e calcarenitos foram depositados em ambiente de frente deltaica e planície de marés, e em superfície o pacote apresenta até 400 m de espessura (SCHNEIDER et al., 1974; BRASIL, 2015).

Dentre os 58 municípios localizados sobre este aquífero, 13 captam água exclusivamente superficial, 16 exclusivamente subterrânea, 4 não se tem informações³ e os demais municípios (43.10%) captam água de forma mista. O aquífero Passa Dois é composto por rochas de baixa permeabilidade. A vazão mediana dos poços que captam água no aquífero Passa Dois é de $3.85 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com vazão mínima de $0.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no município de Prudentópolis e vazão máxima de $30.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no município de Sapopema. As águas desse aquífero são classificadas como bicarbonatadas sódicas e contêm valores elevados de fluoreto, sódio e ferro total, sendo este último o principal elemento a restringir o uso da água *in natura*, mas que pode ser facilmente corrigido em estações de tratamento (AGUASPARANÁ, 2010b; BRASIL, 2015).

1.4.5 Aquífero Guarani

O aquífero Guarani está localizado na região central do estado do Paraná, no limite entre o Segundo e o Terceiro Planaltos Paranaenses (ITCG, 2008b) e se estende por uma área de aproximadamente 2000 km² e aflora nas bacias hidrográficas: Paranapanema I, Itararé, Cinzas, Tibagi, Ivaí e Iguaçu (ITCG, 2010). Na região sul desse aquífero o clima é oceânico, enquanto que na região norte o clima é subtropical úmido (ITCG, 2008a).

³ Não são atendidos pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

O grupo São Bento, de idade juro-cretácea, está inserido na Supersequência Gondwana III de Milani (1997) na Bacia do Paraná e compreende a acumulação de depósitos fluviais, eólicos e vulcânicos, que fora também acrescida uma última acumulação na Bacia do Paraná de deposição fluvial por Schneider et al. (1974) e Soares (1975). No entanto, esta última deposição fluvial faz parte da acumulação de sedimentos da Bacia Bauru (FERNANDES, 1992). A formação inferior do grupo São Bento é referente a formação Piramboia, que consiste de arenitos de coloração esbranquiçada a avermelhada, finos a médios, siltico-argilosos, com estratificação cruzada planar e acanalada. Aos arenitos intercalam-se finas camadas de argilitos e siltitos, bem como leitos de arenitos conglomeráticos com seixos de argilito (BRASIL, 2015). Em superfície a espessura do pacote é de aproximadamente 300 m no Estado do Paraná (BRASIL, 2015). Essa formação é análoga à formação Sanga do Cabral no estado do Rio Grande do Sul (MILANI et al., 2007). A formação superior é referente à formação Botucatu, que é constituída de arenitos avermelhados, finos a médios, normalmente bimodais, friáveis, ocorrendo localmente arenitos argilosos na porção basal desta unidade e no estado do Paraná ainda há a ocorrência de arenitos grosseiros a conglomeráticos com aproximadamente 5 m de espessura (SCHNEIDER et al., 1974). Essa unidade se encontra em discordância com as unidades abaixo e acima, esta última representada pela formação Serra Geral (SCHNEIDER et al., 1974). Em superfície, a espessura da formação Botucatu não ultrapassa 100 m, mas o pacote arenoso que constitui o aquífero Guarani pode apresentar espessura variando entre 50 m a 800 m desde a borda aflorante até as regiões mais centrais da Bacia do Paraná (AGUASPARANÁ, 2018). A formação Serra Geral é constituída por uma sequência de derrames basálticos de idade juro-cretácea de espessura máxima de 1529 m em subsuperfície (SCHNEIDER et al., 1974).

O aquífero Guarani possui uma complexa estruturação hidrogeológica pois apresenta um conjunto de fraturamentos e intrusões de rochas básicas e intermediárias que fazem com que o aquífero Guarani seja constituído por uma série de reservatórios e se comporte como aquífero livre em uma pequena extensão no Paraná, sendo que a sua porção confinada se estende por todo o Terceiro Planalto Paranaense. A vazão mediana dos poços que captam água no aquífero Guarani é de $40.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com vazão mínima de $2.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no município de Ribeirão do Pinhal e

vazão máxima de $470.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no município de Londrina (BRASIL, 2015). Sendo as vazões médias do aquífero classificadas como de muito alta produtividade, onde no trabalho do AGUASPARANA (2010b) a vazão média outorgada é de $74.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e no trabalho do BRASIL (2015) a vazão média outorgada é de $57.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. As águas desse aquífero são classificadas no geral como bicarbonatadas cálcicas, seguida por águas bicarbonatadas sódicas, no entanto conforme se aumenta o grau de confinamento passam a apresentar características mais sulfatadas com aumento de sódio e potássio. Sua porção confinada ainda apresenta valores elevados de dureza total, cloreto, fluoreto, sulfato, nitrato, sódio, ferro total e turbidez, e a temperatura em confinamento aumenta de leste para oeste em direção ao rio Paraná, com variação de 23°C a 68°C (AGUASPARANA, 2010b).

1.4.6 Aquífero Caiuá

O aquífero Caiuá está localizado a noroeste do estado do Paraná, no Terceiro Planalto Paranaense (ITCG, 2008b) e se estende por uma área de aproximadamente 24700 km^2 e aflora em sete bacias hidrográficas: Ivaí, Paraná I, Paranapanema III, Paranapanema IV, Piquiri e Pirapó (ITCG, 2010). Quanto ao clima da região, a predominância é de clima subtropical úmido e os solos da região são compostos majoritariamente por argissolos e latossolos, sendo usados na grande maioria da região para pastagem e campo, e secundariamente para a agricultura (ITCG, 2008a; 2008c; 2008d).

O aquífero Caiuá ocorre nas rochas do grupo Caiuá da Bacia Bauru, de idade cretácea, onde este grupo ocorre nos estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul, ultrapassando possivelmente a fronteira nacional e aflorando no nordeste do Paraguai (FERNANDES; COIMBRA, 2000). Segundo Fernandes e Coimbra (2000) o grupo Caiuá é composto pelas formações Rio Paraná, Goio Erê e Santo Anastácio, que correspondem a sub-ambientes distintos. A formação Rio Paraná é composta por arenitos marrom-avermelhados a arroxeados, finos a muito finos, e ocorre nos estados de São Paulo e Paraná, sendo as maiores espessuras registradas em subsuperfície de 277 m e 205 m, ambas no Paraná. A formação Goio Erê é composta por arenitos quartzosos, marrom-avermelhados a cinza-arroxeados, finos a muito finos, e ocorre no extremo sudeste do Paraná, sendo suas maiores espessuras registradas na superfície em torno de 50 m. A formação Santo Anastácio

é composta por arenitos quartzosos, quase sempre maciços, finos a muito finos, pobremente selecionados e com pequena quantidade de silte, e ocorre nos afluentes do rio Paraná nos estados de São Paulo, Paraná e Minas Gerais, sendo suas espessuras máximas preservadas entre 70 m e 100 m. O grupo Bauru é composto pelas formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe, Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente, Marília e localmente ocorrem rochas vulcânicas intercaladas, mas ele não é muito representativo no estado do Paraná e ocorre somente a noroeste do estado (FERNANDES; COIMBRA, 2000). A ocorrência desse grupo no estado do Paraná ocorre com a formação Vale do Rio do Peixe, que tem sua espessura máxima registrada em torno de 100 m em subsuperfície, medida em perfurações de poços para captação de água subterrânea, e é composta por arenitos marrom-claro rosado a alaranjado com intensa cimentação carbonática local (FERNANDES, 2004).

O aquífero Caiuá está localizado a noroeste do estado do Paraná e cabe ressaltar sua importância para o abastecimento público da região, visto que dos 109 municípios localizados sobre este aquífero, 65% destes captam água exclusivamente subterrânea, 13.7% captam água de forma mista, utilizando tanto a água subterrânea como a água superficial para abastecimento, e os demais não se tem informações⁴. Localmente, o aquífero Caiuá tem um comportamento de semi-confinamento e com coeficiente de armazenamento da ordem de 10^{-3} , e em outros locais se comporta como aquífero livre (AGUASPARANA, 2010b). A vazão mediana dos poços que captam água no aquífero Caiuá é de $10.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com vazão mínima de $0.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no município de Tapejara e vazão máxima de $160.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no município de Loanda. As águas desse aquífero são classificadas como bicarbonatadas cálcicas e secundariamente como bicarbonatadas magnesianas e contêm valores elevados de sólidos totais dissolvidos, sódio e sulfato, mas que não restringem o aproveitamento desse aquífero, ao contrário do cloreto, fluoreto e ferro que interferem frequentemente na qualidade dessas águas. Cabe ainda ressaltar o pH elevado que restringe o uso *in natura*, mas que pode ser facilmente corrigido em estações de tratamento (AGUASPARANA, 2010b; BRASIL, 2015).

⁴ Não são atendidos pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

2 BANCO DE DADOS

O banco de dados utilizado para a caracterização hidrodinâmica dos aquíferos em estudo pertence ao Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2015) e é composto por informações hidrodinâmicas e hidroquímicas de poços tubulares profundos das unidades aquíferas sedimentares: Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani e Caiuá.

O banco de dados utilizado para a caracterização hidrodinâmica dos aquíferos é composto por 845 poços tubulares profundos que captam água dos aquíferos em estudo e apresentam informações dos parâmetros: capacidade específica, condutividade hidráulica, espessura saturada, profundidade do nível estático, profundidade, transmissividade e vazão dos poços (Tabela 2).

Já as informações hidroquímicas se referem às amostras de água de 227 poços tubulares profundos que captam água dos aquíferos em estudo e constam: número da amostra, condutividade elétrica, pH, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade total, dureza total, sílica dissolvida, cloreto, fluoreto, fosfato, sulfato, nitrato, nitrito, cálcio, magnésio, sódio, potássio, ferro total e manganês. Os cátions e ânions utilizados foram cloreto, fluoreto, sulfato, nitrato, nitrito, sódio, ferro total e manganês pois apresentavam valores limites na legislação brasileira para que pudessem ser tratados pelo método Índice Relativo de Risco (IRR) de Athayde et al. (2014).

2.1 Cálculo dos parâmetros hidrogeológicos

O cálculo dos parâmetros hidrogeológicos foi realizado por BRASIL (2015) e a aplicação do método Índice Relativo de Risco para os parâmetros hidroquímicos foi realizado pela autora. A descrição dessas variáveis pode ser observada no Quadro 1.

Quadro 1 - Descrição das variáveis utilizadas para definição de áreas potenciais no trabalho.

Termo	Descrição
Capacidade específica (qs)	Relação entre a vazão de um poço e o respectivo rebaixamento do aquífero. Unidade: (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹
Condutividade hidráulica (K)	Medida referente a facilidade com que a água flui de um aquífero/camada confinante (coeficiente de permeabilidade ou de Darcy). Unidade: m s ⁻¹
Espessura saturada (b)	A zona saturada está situada abaixo da zona freática, onde nela todos os vazios estão preenchidos com água. A espessura saturada neste caso se refere a profundidade do poço subtraída do nível estático e estes valores são incertos visto que não são conhecidos o topo e a base dos aquíferos no trabalho. Unidade: metros
Transmissividade (T)	Parâmetro hidráulico que indica a capacidade do aquífero de transmitir água, em toda a sua espessura saturada. Ou seja, é a vazão do aquífero por unidade de largura (ou perpendicular ao fluxo) em função do gradiente hidráulico unitário. Unidade: m ² s ⁻¹
Nível Estático (NE)	Altura que se estabelece a água quando não influenciada por bombeamento. Unidade: metros
Vazão (Q)	Volume de água que passa a uma área perpendicular à direção do fluxo em um dado tempo. Unidade: m ³ h ⁻¹
Índice Relativo de Risco (IRR)	Índice que classifica maiores e menores riscos toxicológicos pela ingestão de água. Unidade: adimensional

Fonte: ATHAYDE et al. (2014); BRASIL (2015); ABAS (2017).

A espessura saturada foi calculada através da subtração entre o nível estático e a profundidade do poço (BRASIL, 2015). A transmissividade foi calculada através da análise de testes de bombeamento com mais de 12 horas de duração (720 min) e o método utilizado (Jacob, 1950) é descrito em Diniz et al. (2014). Esse parâmetro serviu de base para o cálculo da condutividade hidráulica. As equações utilizadas por BRASIL (2015) foram:

$$T = \frac{(0.183 \cdot Q)}{\Delta S} \quad (1)$$

$$K = \frac{T}{b} \quad (2)$$

Onde: T = transmissividade, Q = vazão, Δs = variação do rebaixamento, K = condutividade hidráulica e b = espessura saturada.

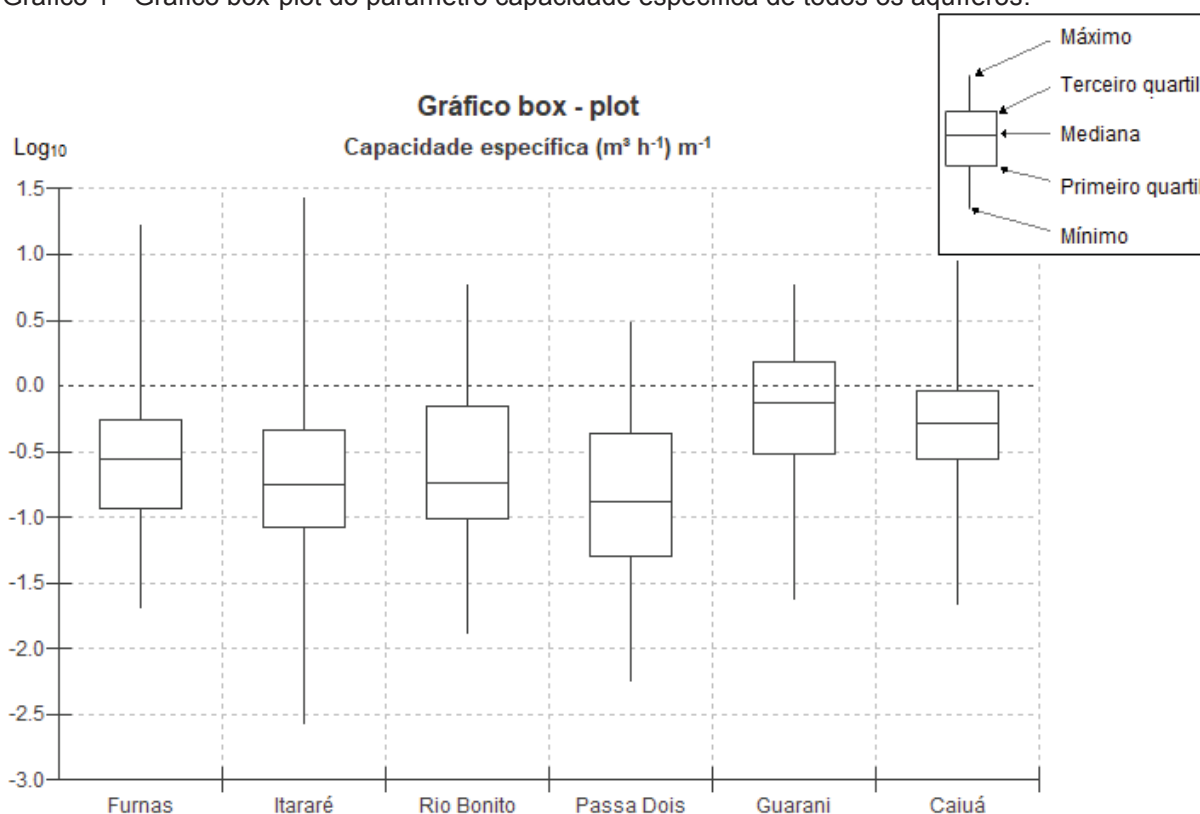
2.2 Estatística dos dados hidrogeológicos

Ter o conhecimento estatístico de determinadas variáveis de uma área é importante e é a base para a compreensão da distribuição e comportamento espacial das mesmas. O comportamento e distribuição desses dados tendem ainda a ser influenciados por n fatores em diferentes graus, porém, dados de recursos hídricos possuem algumas características já conhecidas. Dados de recursos hídricos não apresentam valores negativos, mas apresentam regularmente valores extremos, mesmo com pouca frequência, e normalmente estão relacionados a altos valores. É comum não apresentarem uma distribuição normal e apresentam geralmente assimetria positiva, devido a abundância de baixos valores e poucos altos valores (HELSEL; HIRSCH, 2002).

O sumário estatístico com as informações das médias, mínimos, máximos e os quartis 25°, 50° e 75° foi realizada para os parâmetros de capacidade específica, condutividade hidráulica, espessura saturada, profundidade do nível estático, vazão e transmissividade, em cada um dos aquíferos em estudo. A seguir são apresentados os gráficos box-plot gerados com o auxílio do pacote estatístico BioEstat 5.0 (AYRES et al., 2007) para cada um dos parâmetros em todas os aquíferos (Gráficos 1 a 6) e posteriormente são apresentadas nas subseções a estatística univariada dos parâmetros hidrogeológicos.

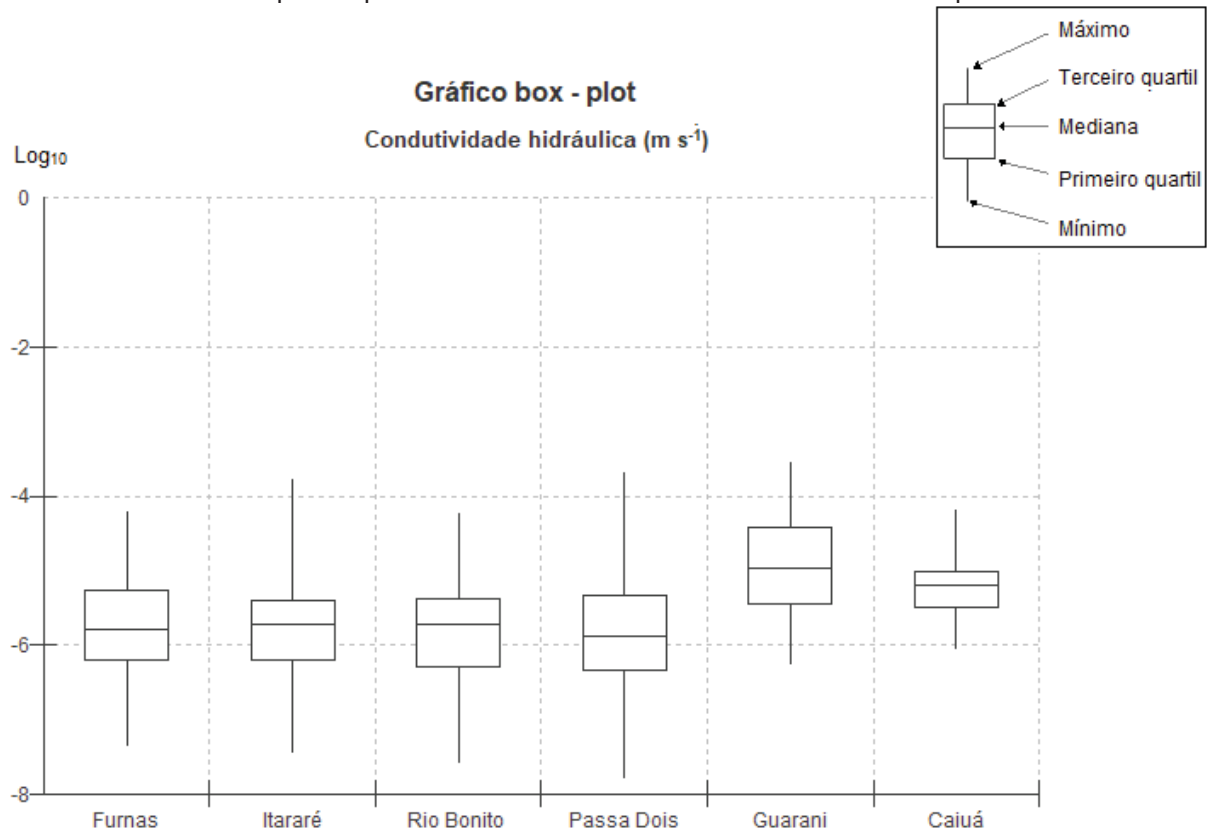
A capacidade específica dos aquíferos apresentou seu maior valor no aquífero Itararé, com $26.6 \text{ (m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$, e seu menor valor também no aquífero Itararé, com $0.003 \text{ (m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$. Sendo que a maior média e mediana ocorreram no aquífero Guarani, com $1.25 \text{ (m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ e $0.75 \text{ (m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$, respectivamente, e a menor média e mediana no aquífero Passa Dois, com $0.36 \text{ (m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ e $0.13 \text{ (m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$, respectivamente (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Gráfico box-plot do parâmetro capacidade específica de todos os aquíferos.



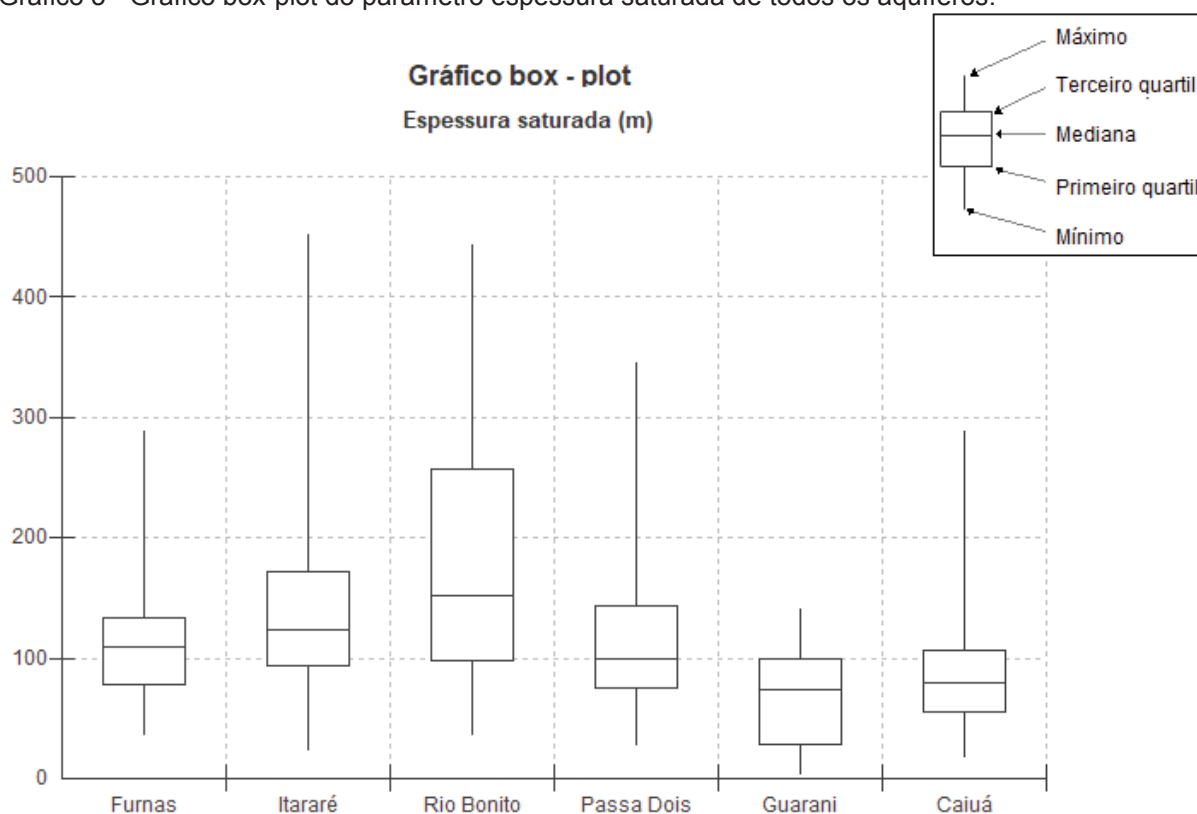
A condutividade hidráulica dos aquíferos apresentou seu maior valor no aquífero Guarani, com $2.88 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, e seu menor valor no aquífero Passa Dois, com $1.63 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$. Sendo que a maior média e mediana ocorreram no aquífero Guarani, com $3.38 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ e $1.10 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, respectivamente, e a menor média e mediana nos aquíferos Rio Bonito e Passa Dois, com $4.91 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ e $1.32 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, respectivamente (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Gráfico box-plot do parâmetro condutividade hidráulica de todos os aquíferos.



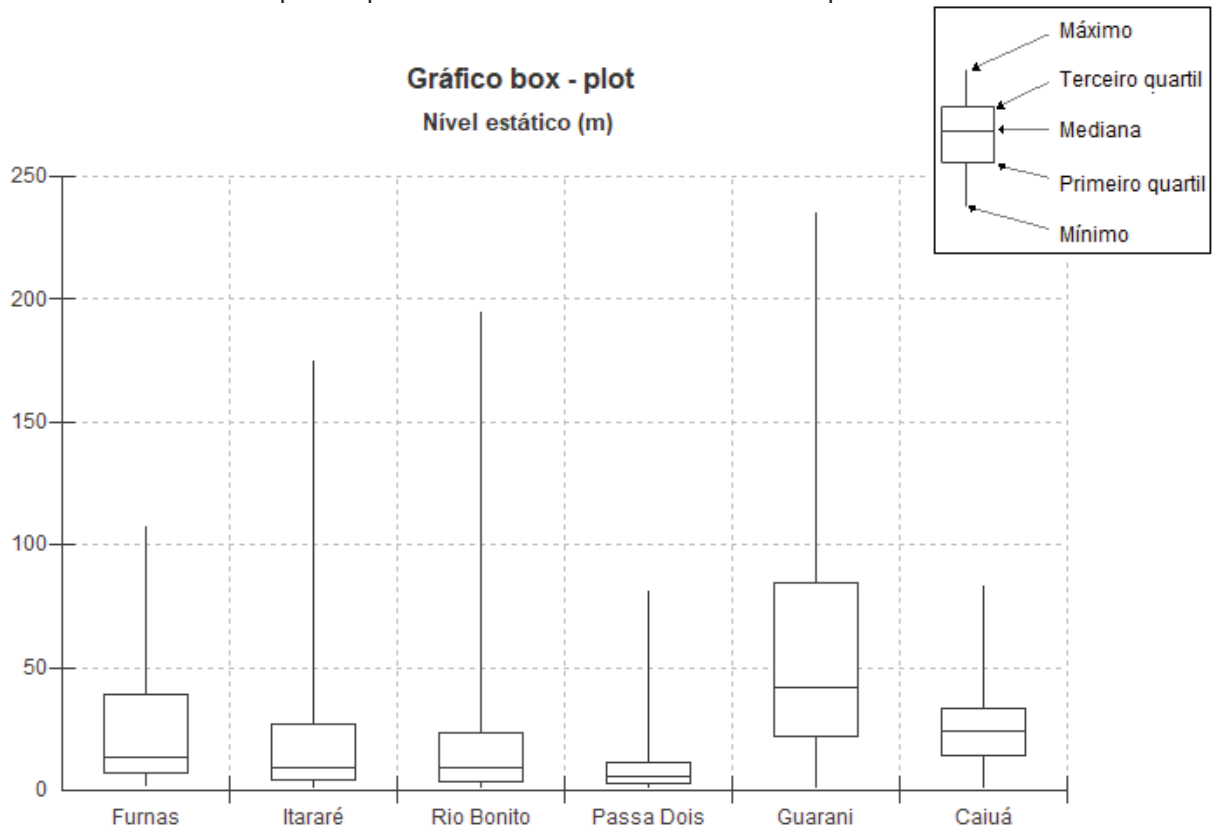
A espessura saturada dos aquíferos apresentou seu maior valor no aquífero Itararé, com 451.60 m, e seu menor valor no aquífero Guarani, com 3.00 m. Sendo que a maior média e mediana ocorreram no aquífero Rio Bonito, com 178.43 m e 152.30 m, respectivamente, e a menor média e mediana no aquífero Guarani, com 67.95 m e 73.00 m, respectivamente (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Gráfico box-plot do parâmetro espessura saturada de todos os aquíferos.



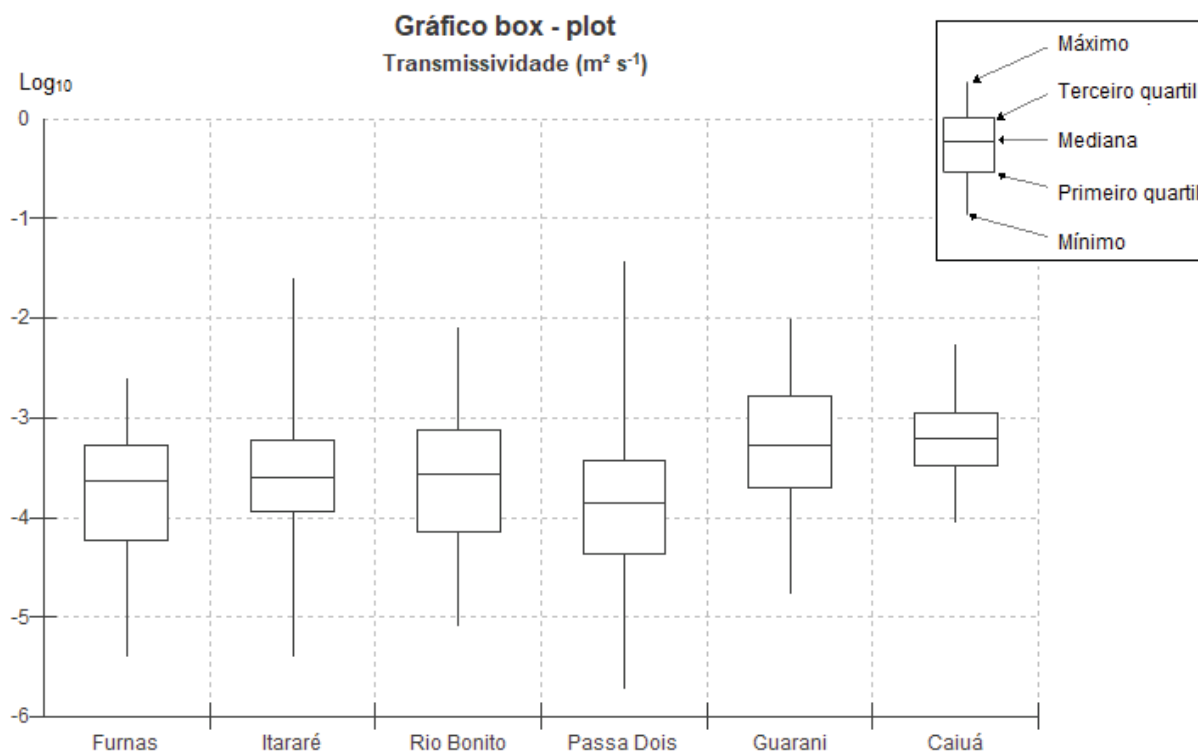
O nível estático dos aquíferos apresentou seu maior valor no aquífero Guarani, com 234.72 m, e seu menor valor no aquífero Itararé, com 0.40 m. Sendo que a maior média e mediana ocorreram no aquífero Guarani, com 58.82 m e 41.56 m, respectivamente, e a menor média e mediana no aquífero Passa Dois, com 11.41 m e 5.50 m, respectivamente (Gráfico 4).

Gráfico 4 - Gráfico box-plot do parâmetro nível estático de todos os aquíferos.



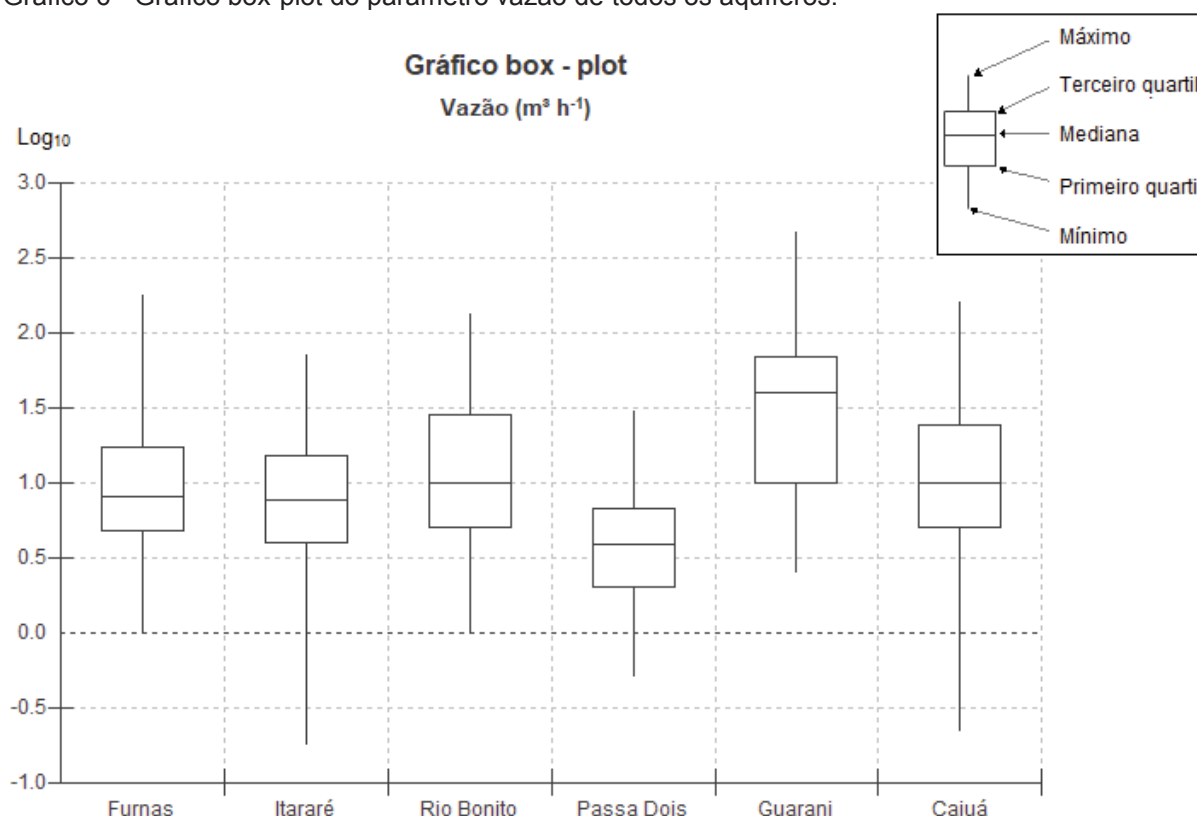
A transmissividade dos aquíferos apresentou seu maior valor no aquífero Passa Dois, com $3.62 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e seu menor valor no aquífero Passa Dois, com $1.90 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Sendo que a maior média e mediana ocorreram nos aquíferos Guarani e Caiuá, com $1.65 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $6.17 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, e a menor média e mediana nos aquíferos Furnas e Passa Dois, com $5.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $1.38 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Gráfico box-plot do parâmetro transmissividade de todos os aquíferos.



A vazão dos aquíferos apresentou seu maior valor no aquífero Guarani, com $470.00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, e seu menor valor no aquífero Itararé, com $0.18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Sendo que a maior média e mediana ocorreram no aquífero Guarani, com $56.85 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $40.00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, respectivamente, e a menor média e mediana no aquífero Passa Dois, com $5.39 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $3.83 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, respectivamente (Gráfico 6).

Gráfico 6 - Gráfico box-plot do parâmetro vazão de todos os aquíferos.



2.2.1 Aquífero Furnas

O banco de dados do aquífero Furnas é composto por 36 poços tubulares profundos (Figura 3) com dados hidrodinâmicos (Tabela 3) e 9 laudos físico-químicos para classificação das águas. A profundidade dos poços varia de 43 a 330 m, sendo que estes possuem uma mediana de rebaixamento de 39.85 m. A espessura saturada do aquífero varia de 35.43 m a 288.52 m na localização dos poços e o nível estático nos poços variou de 1.48 m a 107.32 m. Quanto aos aspectos hidrodinâmicos, a transmissividade e a condutividade hidráulica foram calculados em 22 poços a partir da análise de testes de bombeamento com mais de 12h de duração. Os valores de transmissividade variaram de $3.93 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $2.45 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e os valores de condutividade hidráulica variaram de $4.30 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ a $6.11 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Os demais parâmetros foram calculados para todos os poços. Os valores de capacidade específica variaram de $0.02 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ a $16.66 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ e os de vazão variaram de $1.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $175.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Figura 3 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Furnas. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).

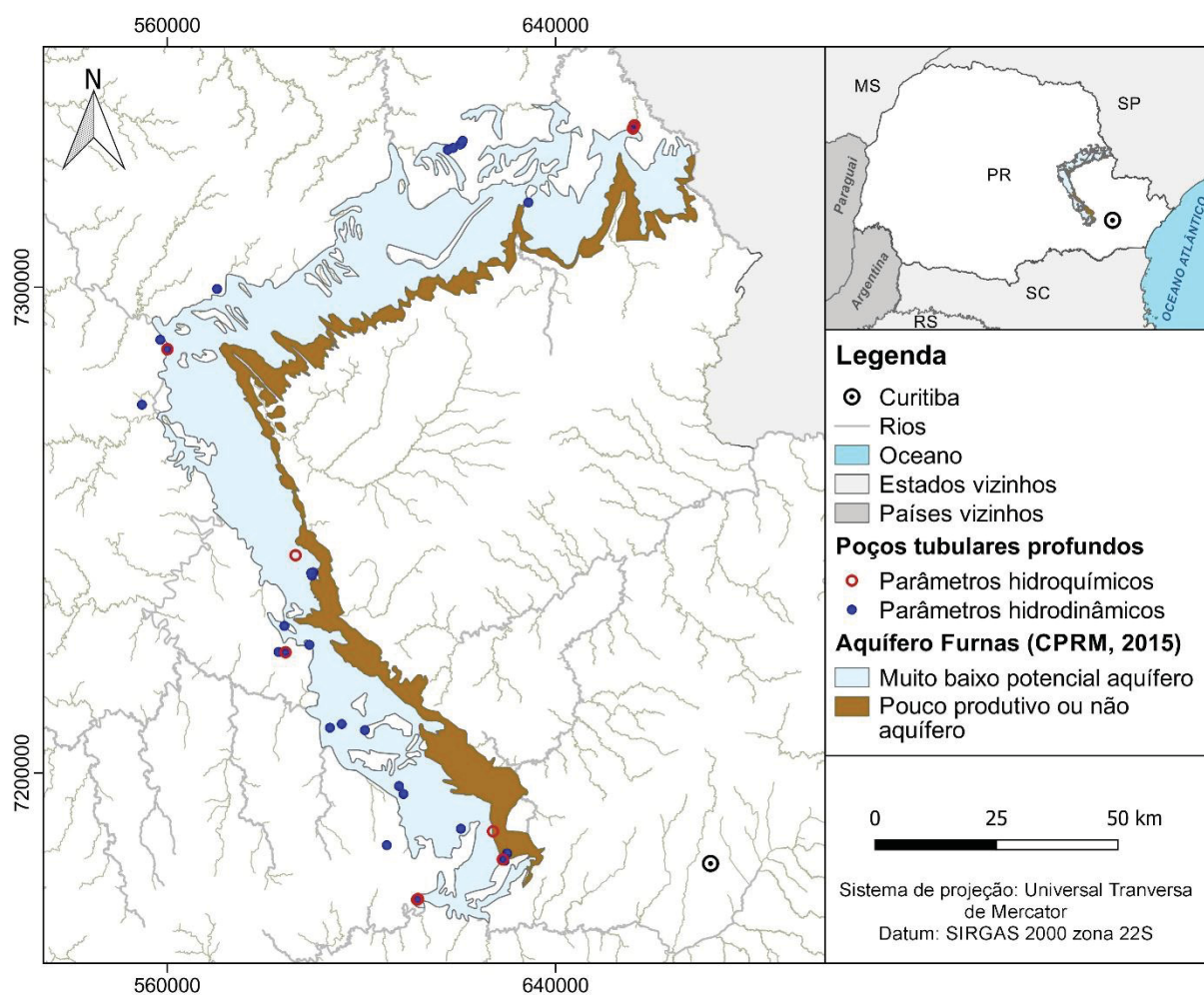


Tabela 2 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Furnas.

Variáveis	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Nível estático (m)	Capacidade específica (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹	Espessura saturada (m)	Transmis- sividade (m ² s ⁻¹)	Condutividade hidráulica (m s ⁻¹)
Dados	36	36	36	36	22	22
Média	21.18	24.59	1.17	112.44	5.05 x10 ⁻⁴	6.50x10 ⁻⁶
Desvio padrão	36.88	25.23	2.92	53.91	6.82 x10 ⁻⁴	1.30 x10 ⁻⁵
Mínimo	1.00	1.48	0.02	35.43	3.93 x10 ⁻⁶	4.38 x10 ⁻⁸
Percentil 25°	4.30	6.63	0.11	78.40	5.22 x10 ⁻⁵	6.02 x10 ⁻⁷
Percentil 50°	8.03	13.21	0.28	109.53	2.41 x10 ⁻⁴	1.68 x10 ⁻⁶
Percentil 75°	17.75	39.09	0.63	135.21	6.41 x10 ⁻⁴	6.77 x10 ⁻⁶
Máximo	175.00	107.32	16.67	288.52	2.45 x10 ⁻³	6.11 x10 ⁻⁵

2.2.2 Aquífero Itararé

O banco de dados do aquífero Itararé é composto por 169 poços tubulares profundos (Figura 4) com dados hidrodinâmicos (Tabela 4) e 36 laudos físico-químicos para classificação das águas. A profundidade dos poços varia de 29 a 452 m, sendo que estes possuem uma mediana de rebaixamento de 47.85 m. A espessura saturada do aquífero varia de 22.2 m a 451.6 m na localização dos poços e o nível estático nos poços variou de 0.4 m a 174.9 m. Quanto aos aspectos hidrodinâmicos, a transmissividade e a condutividade hidráulica foram calculados em 75 poços, a partir da análise de testes de bombeamento com mais de 12h de duração. Os valores de transmissividade variaram de $3.88 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e os valores de condutividade hidráulica variaram de $3.6 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ a $1.7 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Os demais parâmetros foram calculados para todos os poços. Os valores de capacidade específica variaram de $0.0026 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ a $26.66 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ e os de vazão variaram de $0.18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $70 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Figura 4 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Itararé. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).

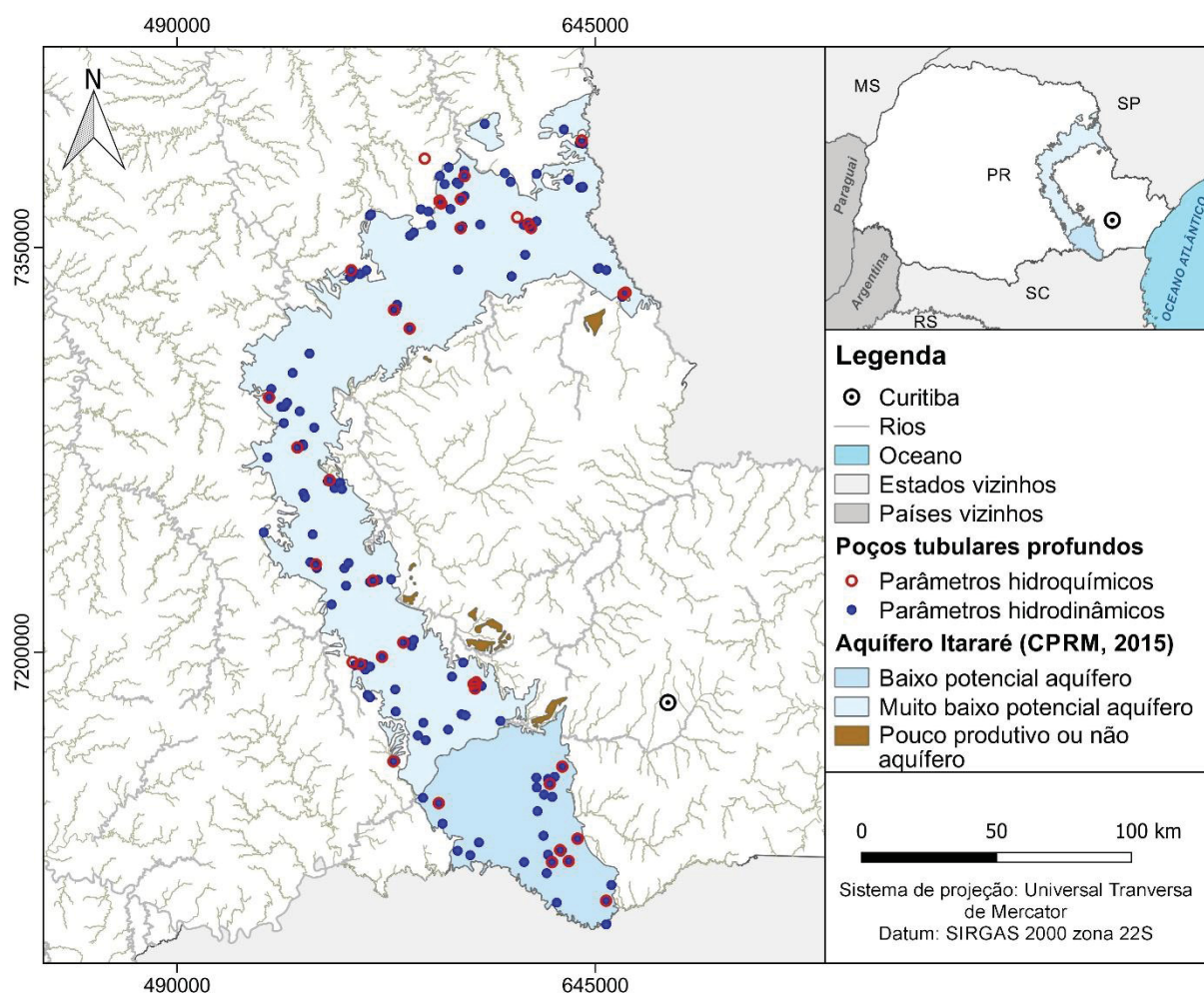


Tabela 3 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Itararé.

Variáveis	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Nível estático (m)	Capacidade específica (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹	Espessura saturada (m)	Transmis- sividade (m ² s ⁻¹)	Condutividade hidráulica (m s ⁻¹)
Dados	169	169	169	167	75	75
Média	12.09	21.41	0.52	141.42	9.39 x10 ⁻⁴	7.79 x10 ⁻⁶
Desvio padrão	12.86	29.10	2.06	76.24	2.99 x10 ⁻³	2.19 x10 ⁻⁵
Mínimo	0.18	0.40	0.00	22.20	3.88 x10 ⁻⁶	3.65 x10 ⁻⁸
Percentil 25°	4.00	4.14	0.08	94.00	1.13 x10 ⁻⁴	6.14 x10 ⁻⁷
Percentil 50°	7.70	9.55	0.18	122.83	2.55 x10 ⁻⁴	1.99 x10 ⁻⁶
Percentil 75°	15.50	27.59	0.48	172.47	6.29 x10 ⁻⁴	3.96 x10 ⁻⁶
Máximo	70.00	174.90	26.60	451.60	2.51 x10 ⁻²	1.73 x10 ⁻⁴

2.2.3 Aquífero Rio Bonito

O banco de dados do aquífero Rio Bonito é composto por 61 poços tubulares profundos (Figura 5) com dados hidrodinâmicos (Tabela 5) e 30 laudos físico-químicos para classificação das águas. A profundidade dos poços varia de 42 m a 452 m, sendo que estes possuem uma mediana de rebaixamento de 57.3 m. A espessura saturada do aquífero varia de 36 m a 442.73 m na localização dos poços e o nível estático nos poços variou de 0.65 m a 194.80 m. Quanto aos aspectos hidrodinâmicos, a transmissividade e a condutividade hidráulica foram calculados em 46 poços a partir da análise de testes de bombeamento com mais de 12h de duração. Os valores de transmissividade variaram de $7.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $7.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e os valores de condutividade hidráulica variaram de $2.6 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ a $5.8 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Os demais parâmetros foram calculados para todos os poços. Os valores de capacidade específica variaram de $0.01 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ a $5.8 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ e os de vazão variaram de $1.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $132.50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Figura 5 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Rio Bonito. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).

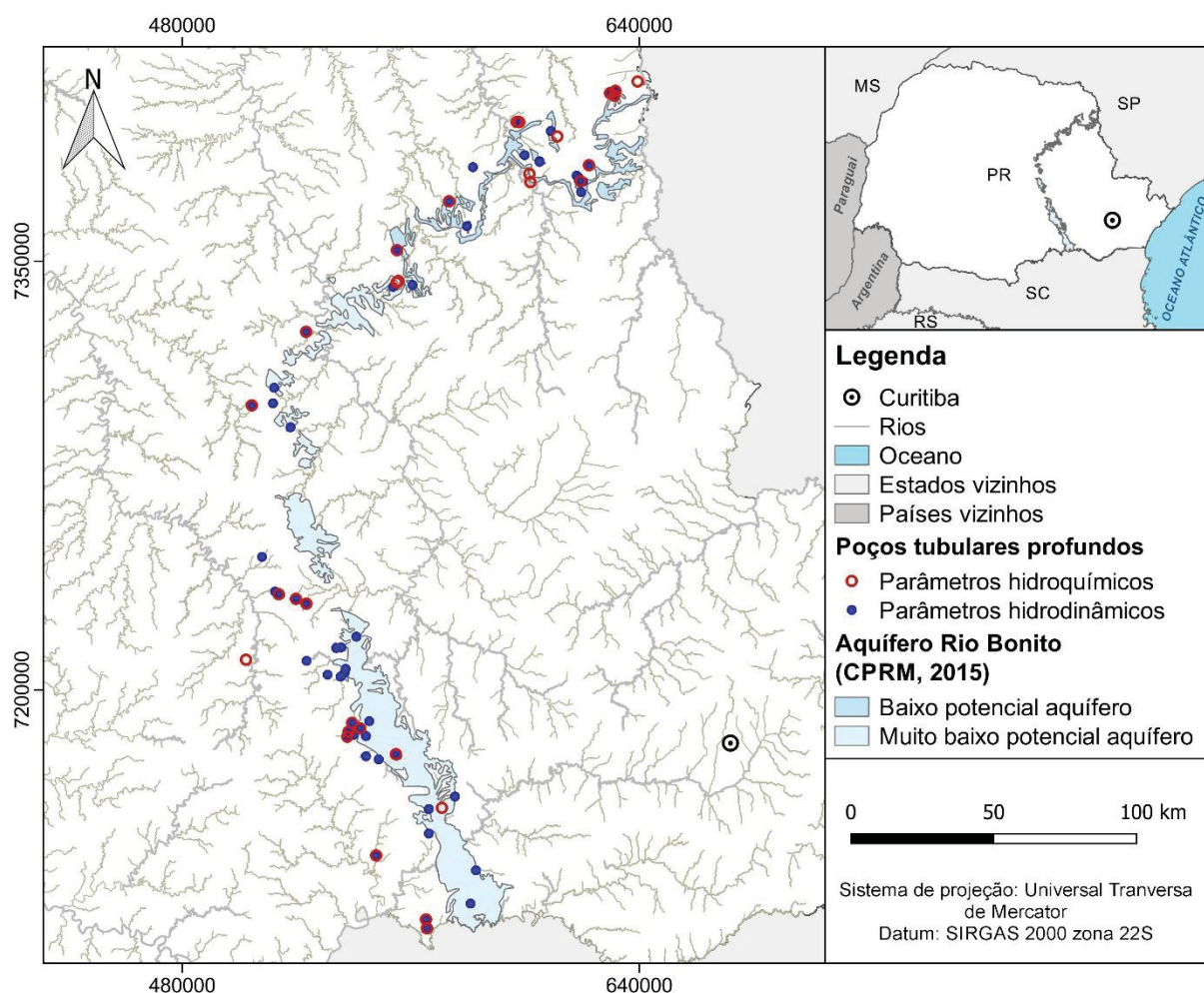


Tabela 4 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Rio Bonito.

Variáveis	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Nível estático (m)	Capacidade específica (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹	Espessura saturada (m)	Transmis- sividade (m ² s ⁻¹)	Condutividade hidráulica (m s ⁻¹)
Dados	61	61	61	61	46	46
Média	20.21	20.92	0.48	178.43	7.96 x10 ⁻⁴	4.91 x10 ⁻⁶
Desvio padrão	25.52	33.54	0.83	91.60	1.53 x10 ⁻³	9.97 x10 ⁻⁶
Mínimo	1.00	0.65	0.01	36.00	7.84 x10 ⁻⁶	2.63 x10 ⁻⁸
Percentil 25°	5.00	3.53	0.10	97.15	7.02 x10 ⁻⁵	4.90 x10 ⁻⁷
Percentil 50°	10.00	9.00	0.18	152.30	2.70 x10 ⁻⁴	1.96 x10 ⁻⁶
Percentil 75°	28.00	23.93	0.75	256.82	7.83 x10 ⁻⁴	4.35 x10 ⁻⁶
Máximo	132.50	194.80	5.83	442.73	7.78 x10 ⁻³	5.78 x10 ⁻⁵

2.2.4 Aquífero Passa Dois

O banco de dados do aquífero Passa Dois é composto por 95 poços tubulares profundos (Figura 6) com dados hidrodinâmicos (Tabela 6) e 8 laudos físico-químicos para classificação das águas. A profundidade dos poços varia de 36 m a 350 m, sendo que estes possuem uma mediana de rebaixamento de 24.70 m. A espessura saturada do aquífero varia de 26.38 m a 345.13 m na localização dos poços e o nível estático nos poços variou de 0.59 m a 81 m. Quanto aos aspectos hidrodinâmicos, a transmissividade e a condutividade hidráulica foram calculadas em 78 poços a partir da análise de testes de bombeamento com mais de 12h de duração. Os valores de transmissividade variaram de $1.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $3.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e os valores de condutividade hidráulica variaram de $1.6 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ a $2.1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Os demais parâmetros foram calculados para todos os poços. Os valores de capacidade específica variaram de $0.01 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ a $3 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ e os de vazão variaram de $0.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Figura 6 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Passa Dois. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).

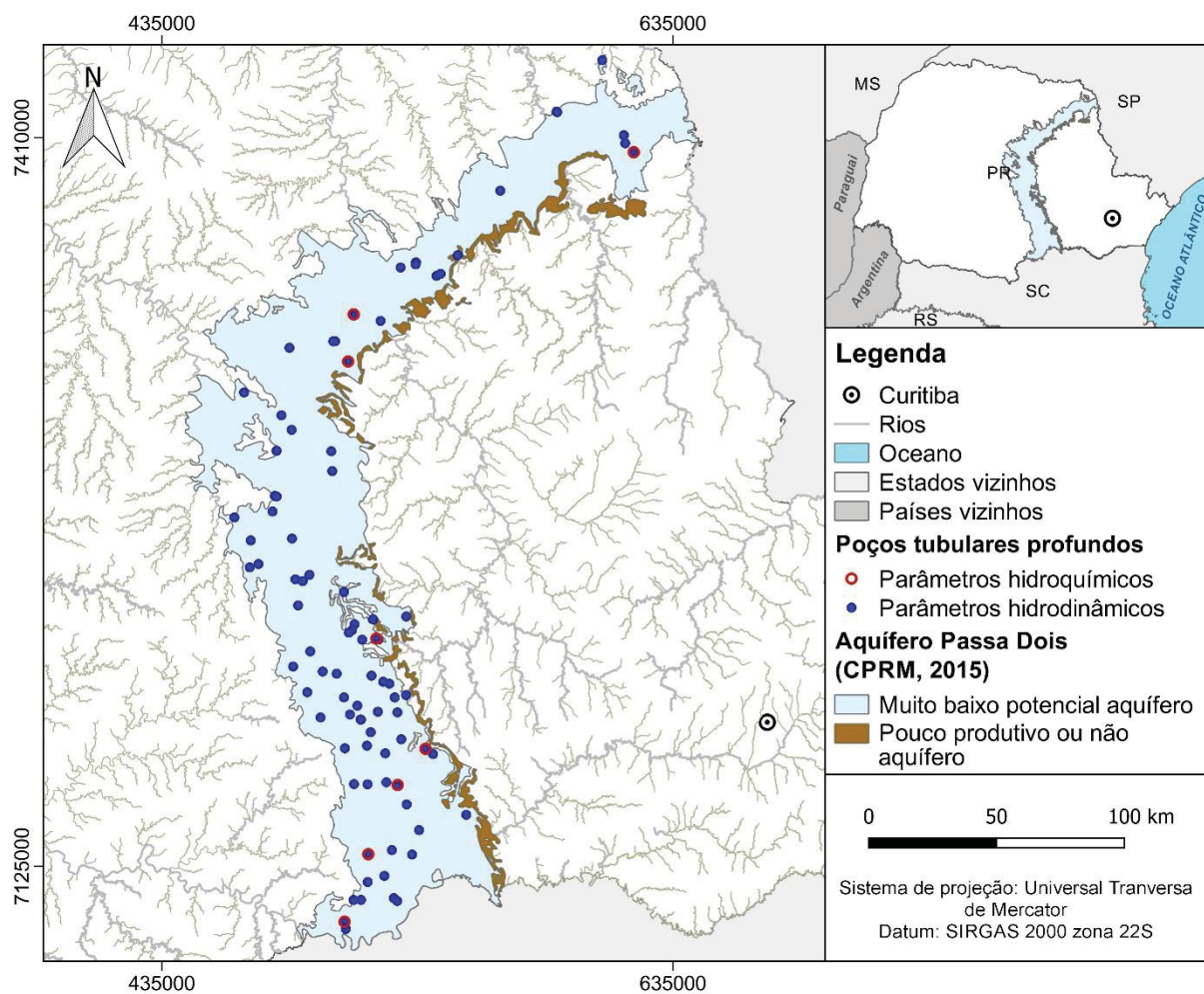


Tabela 5 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Passa Dois.

Variáveis	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Nível estático (m)	Capacidade específica (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹	Espessura saturada (m)	Transmis- sividade (m ² s ⁻¹)	Condutividade hidráulica (m s ⁻¹)
Dados	94	95	94	95	78	78
Média	5.39	11.41	0.36	113.22	1.10 x10 ⁻³	8.04 x10 ⁻⁶
Desvio padrão	5.57	15.22	0.56	59.37	4.34 x10 ⁻³	2.67 x10 ⁻⁵
Mínimo	0.50	0.59	0.01	26.38	1.90 x10 ⁻⁶	1.63 x10 ⁻⁸
Percentil 25°	2.00	3.00	0.05	73.97	4.00 x10 ⁻⁵	4.46 x10 ⁻⁷
Percentil 50°	3.83	5.50	0.13	98.97	1.38 x10 ⁻⁴	1.32 x10 ⁻⁶
Percentil 75°	7.00	11.41	0.45	143.90	3.93 x10 ⁻⁴	5.02 x10 ⁻⁶
Máximo	30.00	81.00	3.00	345.13	3.62 x10 ⁻²	2.10 x10 ⁻⁴

2.2.5 Aquífero Guarani

O banco de dados do aquífero Guarani é composto por 80 poços tubulares profundos (Figura 7) com dados hidrodinâmicos (Tabela 7) e 87 laudos físico-químicos para classificação das águas da região confinada e 13 laudos físico-químicos para classificação das águas da região livre. A profundidade dos poços varia de 60 m a 1 567 m, sendo que estes possuem uma mediana de rebaixamento de 44.70 m. A espessura saturada do aquífero varia de 3 m a 140 m na localização dos poços e o nível estático nos poços variou de 0.5 m a 234.72 m. Quanto aos aspectos hidrodinâmicos, a transmissividade e a condutividade hidráulica foram calculados em 40 poços a partir da análise de testes de bombeamento com mais de 12h de duração. Os valores de transmissividade variaram de $1.66 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $9.80 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e os valores de condutividade hidráulica variaram de $5.53 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ a $2.88 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Os demais parâmetros foram calculados para todos os poços. Os valores de capacidade específica variaram de 0.02 ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) m^{-1} a 5.81 ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) m^{-1} e os de vazão variaram de $2.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $470 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Figura 7 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Guarani. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).

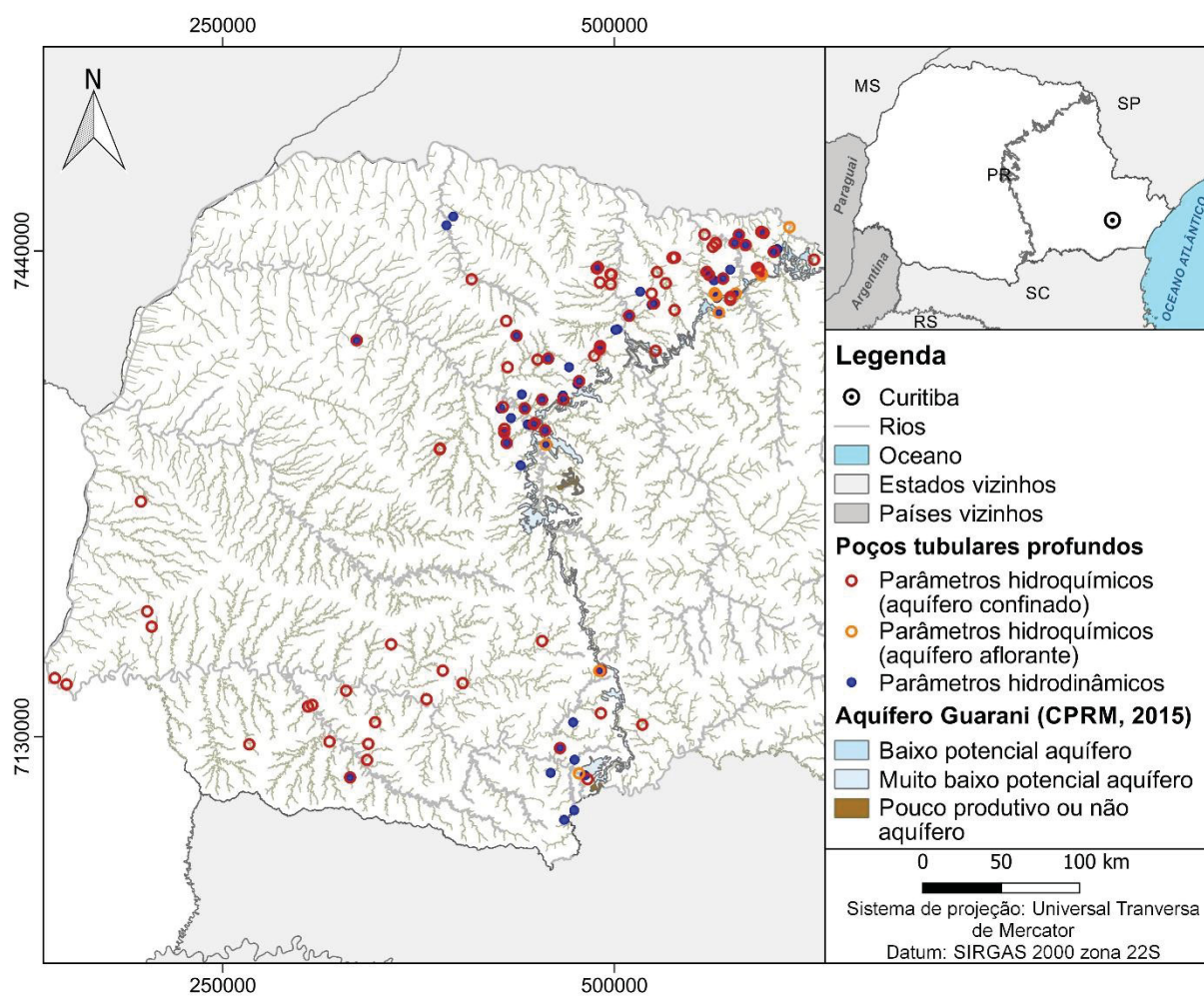


Tabela 6 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Guarani.

Variáveis	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Nível estático (m)	Capacidade específica (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹	Espessura saturada (m)	Transmis- sividade (m ² s ⁻¹)	Condutividade hidráulica (m s ⁻¹)
Dados	80	80	80	40	40	40
Média	56.85	58.82	1.25	67.95	1.65 x10 ⁻³	3.38 x10 ⁻⁵
Desvio padrão	69.68	51.82	1.38	39.00	2.45 x10 ⁻³	5.48 x10 ⁻⁵
Mínimo	2.50	0.50	0.02	3.00	1.66 x10 ⁻⁵	5.53 x10 ⁻⁷
Percentil 25°	10.00	21.48	0.27	27.45	1.88 x10 ⁻⁴	3.11 x10 ⁻⁶
Percentil 50°	40.00	41.56	0.75	73.00	5.24 x10 ⁻⁴	1.10 x10 ⁻⁵
Percentil 75°	76.50	85.65	1.54	100.00	1.69 x10 ⁻³	4.41 x10 ⁻⁵
Máximo	470.00	234.72	5.81	140.00	9.80 x10 ⁻³	2.88 x10 ⁻⁴

2.2.6 Aquífero Caiuá

O banco de dados do aquífero Caiuá é composto por 404 poços tubulares profundos (Figura 8) com dados hidrodinâmicos (Tabela 8) e 44 laudos físico-químicos para classificação das águas da região livre. A profundidade dos poços varia de 25.25 m a 350 m, sendo que estes possuem uma mediana de rebaixamento de 24.20 m. A espessura saturada do aquífero varia de 16.38 m a 287.40 m na localização dos poços e o nível estático nos poços variou de 0.75 m a 83.35 m. Quanto aos aspectos hidrodinâmicos, a transmissividade e a condutividade hidráulica foram calculados em 32 poços a partir da análise de testes de bombeamento com mais de 12h de duração. Os valores de transmissividade variaram de $8.64 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $5.36 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Já os valores de condutividade hidráulica variaram de $8.71 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ a $6.44 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Os demais parâmetros foram calculados para todos os poços. Os valores de capacidade específica variaram de $0.02 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$ a $8.75 (\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) \text{ m}^{-1}$. Os de vazão variaram de $0.22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $160 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Figura 8 - Localização dos poços tubulares profundos com os parâmetros hidrogeológicos do aquífero Caiuá. As cores atribuídas ao aquífero representam o potencial hídrico do mesmo de acordo com o Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná (CPRM, 2015).

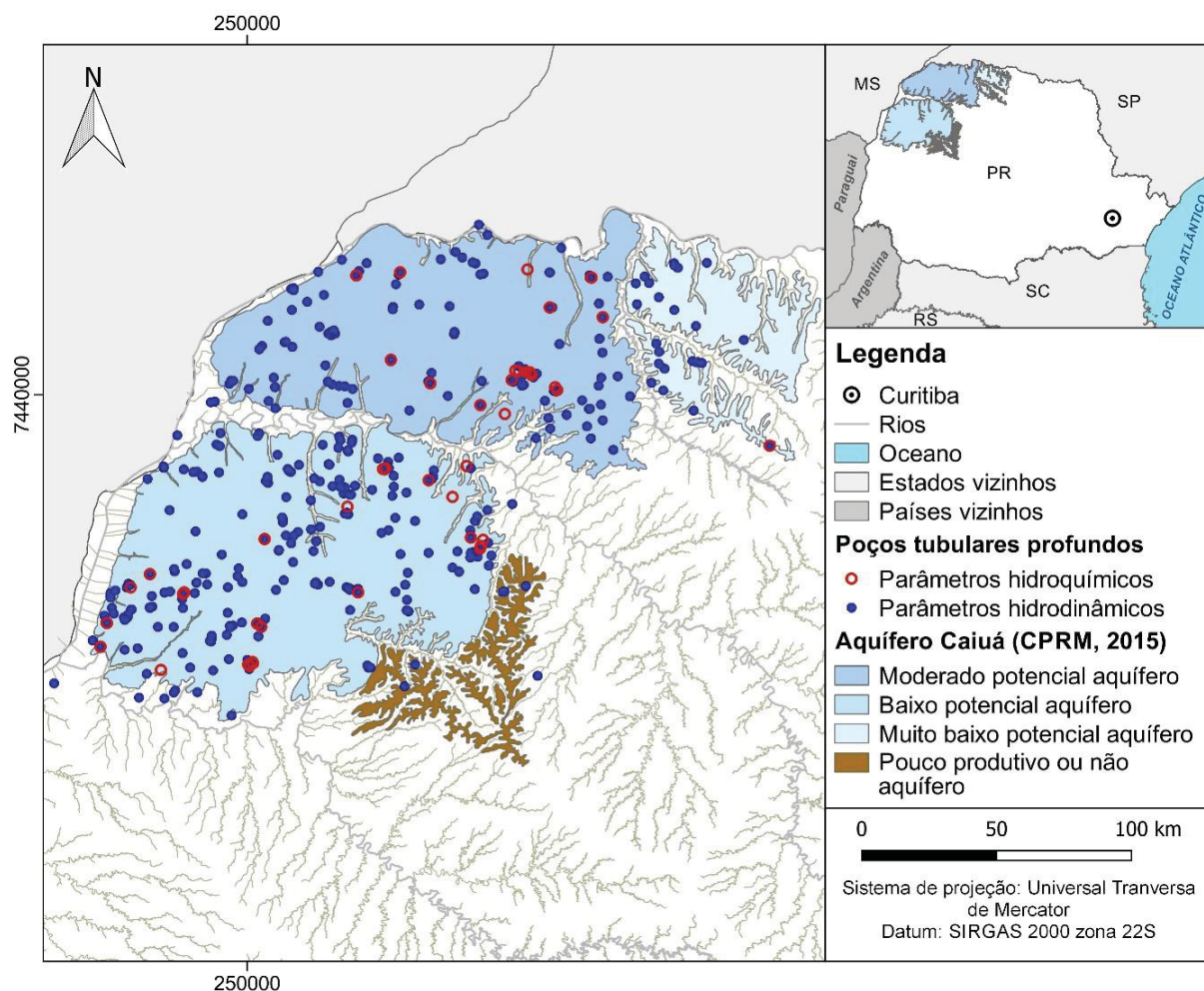


Tabela 7 - Sumário estatístico dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Caiuá.

Variáveis	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Nível estático (m)	Capacidade específica (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹	Espessura saturada (m)	Transmis- sividade (m ² s ⁻¹)	Condutividade hidráulica (m s ⁻¹)
Dados	404	404	404	399	32	32
Média	16.98	25.20	0.79	84.35	1.12 x10 ⁻³	1.24 x10 ⁻⁵
Desvio padrão	18.37	14.22	0.99	40.63	1.38 x10 ⁻³	1.67 x10 ⁻⁵
Mínimo	0.22	0.75	0.02	16.38	8.64 x10 ⁻⁵	8.71 x10 ⁻⁷
Percentil 25°	5.00	14.03	0.28	55.10	3.30 x10 ⁻⁴	3.11 x10 ⁻⁶
Percentil 50°	10.00	24.00	0.52	79.28	6.17 x10 ⁻⁴	6.52 x10 ⁻⁶
Percentil 75°	24.00	33.25	0.92	107.35	1.14 x10 ⁻³	1.00 x10 ⁻⁵
Máximo	160.00	83.35	8.75	287.40	5.36 x10 ⁻³	6.44 x10 ⁻⁵

3. RESULTADOS

3.1 Espacialização de parâmetros hidrogeológicos de aquíferos sedimentares no estado do Paraná

O artigo será submetido para a *Revista de Águas Subterrâneas*.

Resumo. A água subterrânea está localizada abaixo da superfície terrestre e possui significativa importância como reserva hídrica e devido à dificuldade em se obter informações diretas da ocorrência e movimentação desses recursos, o uso de Sistema de Informações Geográficas tem se mostrado eficaz para estudos hidrogeológicos, possibilitando a análise espacial e realização de atividades de geoprocessamento, como a interpolação de parâmetros hidrogeológicos. O objetivo desse trabalho é a avaliação dos métodos de interpolação quando aplicados aos dados hidrogeológicos, verificando o impacto gerado pelo processo de estimativa, utilizando os interpoladores Inverso da distância ponderada, Triangulação e Topo to Raster para estimar áreas não amostradas de parâmetros hidrogeológicos nos aquíferos sedimentares Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani e Caiuá no estado do Paraná. O método utilizado visa as interpolações de mais rápido processamento e de fácil aplicação, avaliando três situações: número de dados usados pelo interpolador e ocorrência de superestimativas e subestimativas. O resultado mostrou o efeito da interpolação com dados dessa natureza e como foi o seu comportamento, sendo que para parâmetros hidrogeológicos o interpolador Inverso da distância ponderada foi o que melhor se adequou dentre os métodos estudados por gerar menores variações dos valores medidos. A escolha do interpolador ideal a dados hidrogeológicos é uma importante etapa para interpretação de mapas gerados a partir de dados que não contemplam a área completa do estudo. Dessa forma, avaliar o erro ou resíduos que são gerados ao se utilizar diferentes interpoladores colabora para essa análise quantitativamente.

Palavras-chave. interpolação, hidrogeologia, Bacia do Paraná, Bacia Bauru.

Spatialization of hydrogeological parameters of sedimentary aquifers in the state of Paraná

Abstract. Groundwater is located below the earth's surface and has significant importance as a water reserve and due to the difficulty in obtaining direct information on the occurrence and movement of these resources, the use of the Geographic Information System has proved effective for hydrogeological studies, allowing the analysis spatial and geoprocessing activities, such as the interpolation of hydrogeological parameters. The objective of this work is the evaluation of the interpolation methods when applied to the hydrogeological data by verifying the impact generated by the estimation process, using the Inverse Distance, Triangulation and Topo to Raster interpolators to estimate non-sampled areas of hydrogeological parameters in Furnas sedimentary aquifers, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani and Caiuá in the state of Paraná. The method used is the interpolations of faster processing and easy application, evaluating three situations: a number of data used by the interpolator and occurrence of overestimations and underestimates. The result showed the effect of the interpolation with data of this nature and how is its behavior, being that for hydrogeological parameters the Inverse interpolator of the weighted distance was the one that was better adapted among the studied methods to generate smaller variations of the real values. The choice of the ideal interpolator to the hydrogeological data is an important step for interpreting maps generated from data that do not contemplate the complete area of the study. Thus, to evaluate the error or residues that are generated when using different interpolators collaborates for this analysis quantitatively.

Keywords. interpolation, hydrogeology, Paraná Basin, Bauru Basin.

3.1.1 Introdução

A água subterrânea está localizada em rochas, consolidadas ou não consolidadas, abaixo da superfície terrestre e possui significativa importância como reserva ou até mesmo opção de obtenção de água em locais de escassez hídrica.

Os meios convencionais para extrair informações de ocorrência e potencialidades desse recurso envolvem estudos geológicos e hidrogeológicos de campo, e métodos geofísicos (FEITOSA et al., 2008). No entanto, nem sempre esses meios são capazes de observar os variados fatores que controlam a ocorrência da água subterrânea, e com isso, o uso de Sistema de Informações Geográficas (SIG) tem se mostrado eficaz para estudos hidrogeológicos, possibilitando a análise espacial e realização de atividades de geoprocessamento, como a interpolação de parâmetros hidrogeológicos.

O objetivo desta pesquisa é avaliar métodos de interpolação em unidades aquíferas sedimentares do estado do Paraná, para identificar qual o método de interpolação que melhor se adequa ao banco de dados. Os dados interpolados são: capacidade específica, condutividade hidráulica, espessura saturada, profundidade no nível estático, transmissividade, vazão e o índice relativo de risco, sendo este último calculado com base no método de Athayde et al. (2014).

Conhecer a distribuição espacial de diferentes parâmetros hidrogeológicos permite contribuir com o gerenciamento dos recursos hídricos e estimar áreas potenciais à perfuração de poços tubulares, onde há menor densidade de dados nos aquíferos.

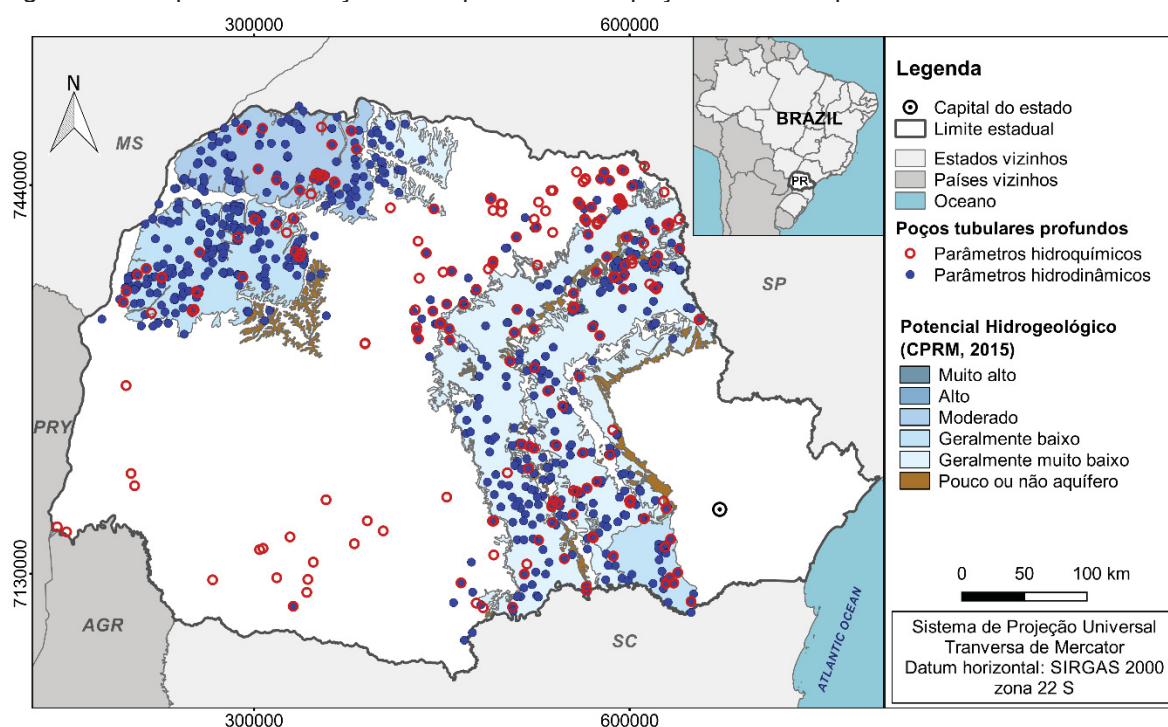
3.1.2 A área de estudo

O estado do Paraná está localizado na região hidrográfica do Paraná, que é uma região de grande desenvolvimento econômico e com a maior densidade populacional do país, além de possuir as maiores demandas por recursos hídricos (ANA, 2014). No ano de 2010, no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Paraná, a disponibilidade hídrica no estado era de 299888 L s^{-1} e a demanda hídrica de 51364 L s^{-1} para atender ao abastecimento público (42%), setor industrial (24%), agrícola (21%) e pecuário (13%). A estimativa da população no estado do Paraná no ano de

2018 foi de 11348937 pessoas, sendo o 6º estado mais populoso no país, e com uma área de 199315 km² (IBGE, 2019).

São foco deste estudo são os aquíferos sedimentares do estado que se estendem por uma área de aproximadamente 64600 km² em superfície: Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani e Caiuá (Figura A1).

Figura A 1. Mapa de localização dos aquíferos e dos poços tubulares que foram utilizados no estudo.



3.1.2.1 Hidrogeologia da área

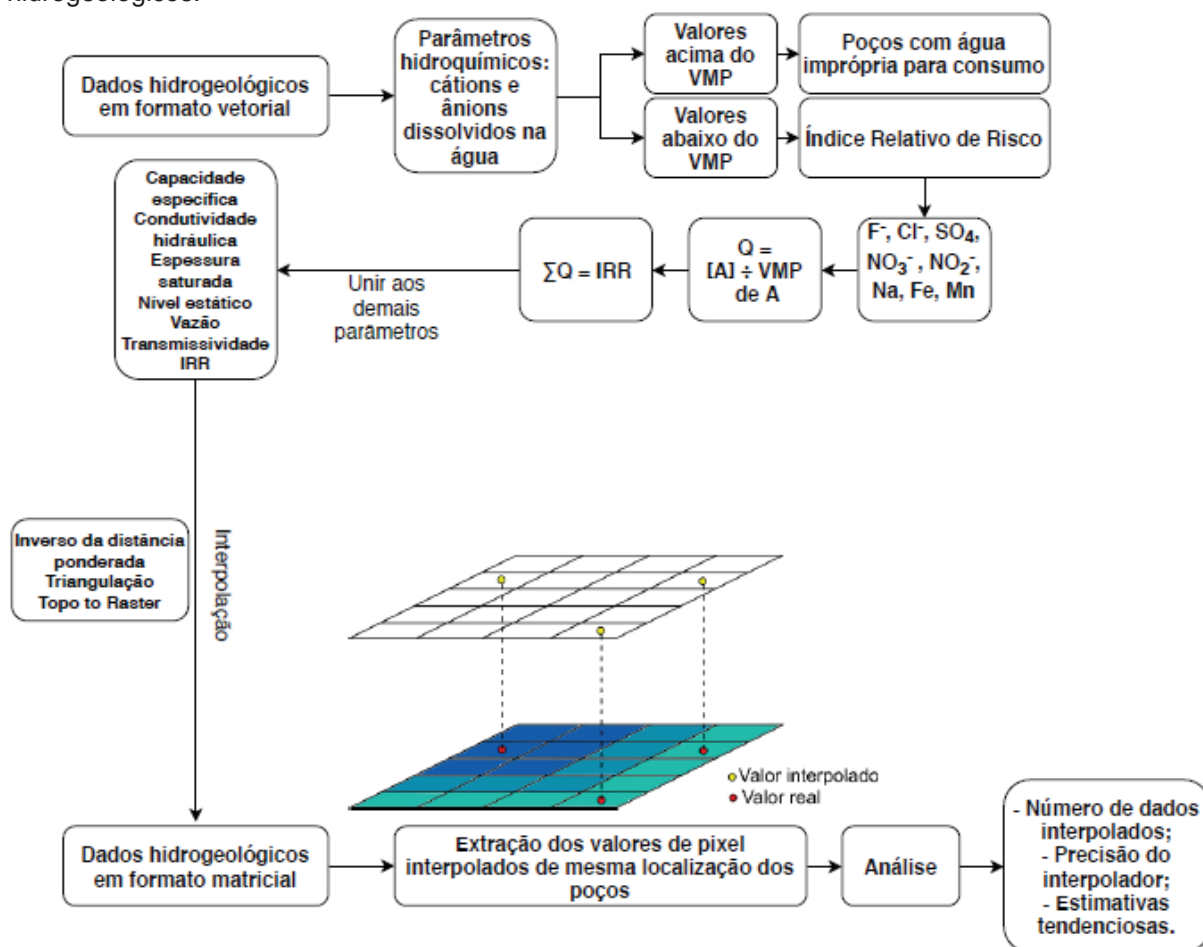
As unidades geológicas da Bacia do Paraná que compõem as rochas dos aquíferos em estudo correspondem a grandes ciclos transgressivos-regressivos paleozoicos e unidades continentais mesozoicas com rochas ígneas associadas (MILANI et al., 2007). Após o vulcanismo Serra Geral, ocorrido durante o Cretáceo, houve mudanças significativas na evolução da Plataforma Sul-Americana e foram criadas novas condições de sedimentação, o que levou a acumulação de sedimentos em uma depressão com evolução geológica distinta da Bacia do Paraná na região centro-meridional dessa plataforma, denominada Bacia Bauru, de idade neocretácea (FERNANDES, 1992). E nesse contexto geológico estão inseridas as rochas que compõem os aquíferos em estudo: Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani e Caiuá.

O aquífero Furnas é composto por arenitos de granulometria média a grossa majoritariamente, e possui espessura em subsuperfície de até 300 m e em superfície de até 200 m (SCHNEIDER et al., 1974). O aquífero Itararé é composto por uma alternância de formações geológicas de arenitos, siltitos e lamitos, e que possuem uma espessura de até 1 300 m (FRANÇA; POTTER, 1988). O aquífero Rio Bonito é composto por arenitos, argilitos e areno-argilitos, sendo este último onde ocorrem os principais leitos de carvão na Bacia do Paraná, e sua espessura em superfície é de até 300 m (SCHNEIDER et al., 1974). O aquífero Passa Dois é composto por argilitos, folhelhos e siltitos, associados a níveis de calcários, onde a maior espessura registrada é de 318 m (SCHNEIDER et al., 1974). O aquífero Guarani é composto por arenitos finos a médios, localmente ocorrem arenitos argilosos e arenitos grossos a conglomeráticos, e a espessura varia de 50 m a 800 m (SCHNEIDER et al., 1974). Já o aquífero Caiuá é composto por arenitos de granulometria muito fina a fina, com maior espessura registrada de 277 m (FERNANDES; COIMBRA, 2000).

3.1.3 Material e Métodos

O banco de dados utilizado para a caracterização hidrodinâmica dos aquíferos em estudo pertence ao Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2015) e é composto por informações hidrodinâmicas e hidroquímicas de poços tubulares profundos dos aquíferos sedimentares: Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani e Caiuá. Os parâmetros hidroquímicos foram tratados com o método Índice Relativo de Risco (IRR), proposto por Athayde et al. (2014) e então foram processados da mesma forma que os demais parâmetros. As etapas desse trabalho são apresentadas na Figura A2.

Figura A 2. Etapas para definir o método de interpolação mais adequado aos parâmetros hidrogeológicos.



3.1.3.1 Índice Relativo de Risco

O IRR foi proposto por Athayde et al. (2014) com o objetivo de determinar bacias hidrográficas que possuíssem maiores e menores riscos toxicológicos causados pela ingestão de água *in natura*. Para o cálculo do IRR são utilizados valores abaixo dos valores máximos permitidos (VMP) de parâmetros químicos de acordo com legislações nacionais ou internacionais com a finalidade de classificar a potabilidade da água (ATHAYDE et al., 2014). A proposta desse método é classificar as amostras que estariam aptas ao consumo em amostras que possuem risco à ingestão devido a concentração de elementos.

Na presente pesquisa o método foi aplicado às concentrações de elementos presentes na água subterrânea de aquíferos sedimentares. Os parâmetros químicos primeiramente foram comparados aos VMP das legislações vigentes e as amostras que não ultrapassaram o VMP foram utilizadas para o cálculo do IRR, onde os

cátions e ânions presentes nas amostras são divididos pelo VMP para aquele parâmetro. As amostras foram tratadas estatisticamente e aquelas que possuem maior risco à saúde são as que apresentam valores acima do 3º quartil, ou seja, os 25% dos dados com valores mais elevados.

Como as características químicas das águas variam em cada aquífero, o cálculo estatístico é realizado por aquífero. No presente trabalho o IRR foi utilizado para hierarquizar os poços segundo os elementos dissolvidos na água e que podem representar risco cumulativo decorrente da ingestão da água subterrânea nos aquíferos sedimentares no estado do Paraná. Foram utilizados para o cálculo 8 cátions e ânions dissolvidos na água pois estes eram os que estavam disponíveis no banco de dados e que possuem VMP estabelecidos (Tabela A1).

Tabela A 1. Parâmetros físico-químicos presentes no banco de dados e respectivos valores máximos permitidos da Portaria 2914/11 e Portaria de consolidação nº5/2017.

Variáveis	Unidade	Valores Máximos Permitidos (VMP)
Dureza Total	mg L ⁻¹ de CaCO ₃	500
Sólidos Totais Dissolvidos	mg L ⁻¹	1000
Cloreto	mg L ⁻¹	250
Fluoreto	mg L ⁻¹	1.5
Sulfato	mg L ⁻¹	250
Nitrato	mg L ⁻¹	10
Nitrito	mg L ⁻¹	1
Sódio	mg L ⁻¹	200
Ferro Total	mg L ⁻¹	0.3
Manganês	mg L ⁻¹	0.1
Turbidez	uT	5
Cor	uH	15
pH	°C	6 a 9.5

Fonte: BRASIL (2011); BRASIL (2017).

Os valores de IRR obtidos em cada aquífero foram interpolados para espacialização desse parâmetro e assim reconhecer áreas com risco toxicológico de acordo com o método.

3.1.3.2 Interpolação de dados hidrogeológicos

Nessa pesquisa foram utilizados os interpoladores Inverso da Distância Ponderada (IDW), Triangulação (TIN) e *Topo to raster*, a fim de comparar ao final o interpolador que gerou superfícies interpoladas que mais se aproximassem dos valores medidos. O programa ArcGIS 10.5 foi utilizado para aplicar o interpolador *Topo To Raster*, enquanto que para dos demais processos foi utilizado o programa QGIS 2.18.

Os dados hidrogeológicos possuem uma grande variabilidade lateral e a premissa de dados mais próximos serem mais parecidos é válida quando se escolhe interpoladores. A proposto do estudo é contribuir para o gerenciamento dos recursos hídricos e dessa forma foram utilizados interpoladores de mais rápido e fácil processamento, em detrimento dos métodos geoestatísticos. As principais características, vantagens e desvantagens dos interpoladores são apresentadas no Quadro A1.

Quadro A 1 - Quadro apresentando os princípios, vantagens e desvantagens dos interpoladores.

	Inverso da Distância Ponderada	Triangulação	Topo to Raster
Princípio	Estima valores em pontos sem amostragem usando a distância e os valores de pontos próximos conhecidos. A suposição é que os pontos amostrados mais próximos do ponto sem amostragem são mais semelhantes a ele do que aqueles mais distantes em seus valores.	Estima valores com a criação de uma superfície formada por triângulos a partir de pontos vizinhos mais próximos. Para fazer isso, círculos circunscritos são inseridos em volta dos pontos amostrais, então, suas intersecções são conectadas por uma rede de triângulos não sobrepostos e os mais compactos possíveis.	Estima os valores usando a repetição do método de diferenças finitas, onde são criadas grades estruturadas. O método busca atingir resoluções cada vez melhores com o processo, começando de uma grade inicial larga até uma grade que tenha resolução definida pelo usuário.
Vantagens	Intuitivo, eficiente e de rápido processamento.	Intuitivo e de rápido processamento.	Eficiência de interpolação local e global, e de rápido processamento.
Desvantagens	Trabalha melhor com pontos distribuídos regularmente e quando há agrupamento de dados podem ocorrer erros. Apresenta o efeito mira ao redor dos pontos observados.	Superfícies não são suaves e geralmente não é adequado para extrapolação para além da área com pontos amostrais coletados.	Os dados de entrada (contorno ou ponto) podem ser muito densos ou muitos espaçados para o tamanho da célula de saída especificado. Se uma célula de saída cobre vários contornos ou pontos de entrada, o algoritmo pode não ser capaz de determinar um valor para essa célula.

Fonte: LI; HEAP (2008), MARCUZZO et al. (2011), ARCGIS (2018), QGIS (2018).

Antecedendo ao processo de interpolação é necessária a escolha do tamanho de célula ideal, que influencia diretamente o valor da estimativa, e no trabalho de Hengl (2006) são apresentadas regras para definir uma resolução de grade adequada para mapas com base nas propriedades dos dados.

Uma das regras apresentadas é para definir o tamanho de células ideal para uma amostragem de pontos e enfatiza que para a amostragem ser consistente o ideal é que se tenha uma densidade igual de amostras na área. Essa consistência é dificilmente obtida em dados hidrogeológicos pelo fato de que os poços são locados em áreas para abastecimento populacional e essa malha não é regular no espaço. O cálculo do tamanho de célula ideal em dados distribuídos de forma irregular deve ser realizado de forma mais rigorosa e esta deve ser no máximo metade do espaçamento médio entre os pares de pontos mais próximos, e para definição do tamanho mínimo são observadas, por exemplo, o erro na plotagem de pontos (ROSSITER, 2003). A análise do erro na plotagem de pontos se torna uma boa opção quando o espaçamento entre os poços é irregular, variando de dezenas a centenas de metros em alguns aquíferos, e ao erro de posicionamento devido à falta de padronização durante a coleta das medidas.

Dessa forma, foram utilizados os princípios de Hengl (2006) e Rossiter (2003) para definir o tamanho de célula ideal de acordo com a determinação da escala efetiva e localização de máxima acurácia (MLA), respectivamente. A interpretação que se tem da equação de Rossiter (2003) é que um número menor que o MLA é inconsistente para a escala de trabalho e esses valores devem ser descartados.

Os dados em ambiente SIG podem ser plotados com maior precisão, com erro de plotagem é de 0.1 mm. Levando em consideração esse ponto, a localização de máxima acurácia (*maximum location accuracy*) é dada pela multiplicação da escala efetiva e o erro de plotagem (ROSSITER, 2003).

$$MLA = SN * 0.1\text{mm (ou } 0.0001\text{m)} \quad (3)$$

Onde: MLA é a localização de máxima acurácia e SN é o número de escala (*scale number*).

Como número de escala pode ser utilizada a escala efetiva de Hengl (2006):

$$SN = \sqrt{\frac{A}{N}} * 10^2 \quad (4)$$

Onde, SN é o número de escala, A é a área de amostragem e N é a quantidade de dados.

Como números inferiores ao MLA eram inconsistentes para a escala de trabalho, foi adotado o maior valor de MLA obtido em todos os aquíferos para ser trabalhado e assim foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Inverso da distância ponderada: pontos como dados primários de entrada; coeficiente p de valor 4; tamanho de célula de 200 m x 200 m.
- Triangulação: pontos como dados primários de entrada; método de interpolação linear; tamanho de célula de 200 m x 200 m.
- *Topo to raster*: pontos como dados primários de entrada; tamanho de célula de 200 m x 200 m; sem imposição de drenagem.

3.1.3.3 Análise da estimativa

Para avaliar a eficiência do método foram calculados os resíduos (Equação 5) e a porcentagem da variação entre os valores reais e estimados (Equação 6) em cada ponto utilizado na estimativa. Se optou por esse processo devido a baixa quantidade de dados nos aquíferos.

$$r = v' - v \quad (5)$$

$$p = \left(\frac{v' - v}{v} \right) * 100 \quad (6)$$

Onde: r é o valor do resíduo, v' é o valor estimado, v é o valor real e p é a variação entre os valores reais e estimados em porcentagem.

Os resultados foram analisados observando as seguintes situações:

- a) A quantidade de dados utilizados pelo interpolador na estimativa: quanto mais dados o interpolador utilizar na estimativa, espera-se que a superfície interpolada seja mais condizente com a realidade;

b) O número de dados que estimaram valores com variação maior que zero por cento (0%) entre os valores medidos e os valores estimados: quanto mais próximo de zero por cento as variações forem, mais precisa é a interpolação.

c) Adotou-se que variações acima de 10% eram estimativas que comprometiam o resultado da superfície interpolada: superestimativas, quando os valores aumentaram e subestimativas, quando os valores diminuíram.

3.1.4 Resultados e discussão

Na etapa que antecede o cálculo do IRR os valores dos parâmetros foram comparados aos VMP e dessa forma verificou-se que 50% das amostras no aquífero Rio Bonito, 40% das amostras no aquífero Guarani confinado, 38% das amostras no aquífero Passa Dois, 31% das amostras no aquífero Itararé, 14% das amostras no aquífero Caiuá e 11% das amostras no aquífero Furnas eram impróprias para consumo humano pois apresentavam valores acima do permitido. O aquífero Guarani livre não apresentou amostras com valores acima do VMP, o que se deve provavelmente a rápida circulação de água nesse trajeto, no entanto apresenta maior risco de contaminação devido a urbanização. Já a região confinada do aquífero Guarani apresenta valores elevados de sulfato, cloreto, sódio e sólidos totais dissolvidos devido ao maior tempo de permanência da água no aquífero.

Os parâmetros responsáveis pela não potabilidade nos aquíferos são apresentados na Tabela A2. Se observa que o ferro, seguido pelos fluoretos e manganês foram os principais responsáveis pela não potabilidade.

Tabela A 2. Aquíferos e principais parâmetros responsáveis pela não potabilidade.

Unidades Aquíferas	Fe (total)	F⁻	Mn	NO₃⁻	Na	SO₄⁻²	Cl⁻	NO₂⁻
Furnas	1							
Itararé	6	3	2			1		1
Rio Bonito		12	3		1			
Passa Dois	3							
Guarani confinado	5	13		1	10	7	4	
Caiuá	2	1	2	3				

Com a retirada das amostras que ultrapassavam o VMP, 8 amostras do aquífero Furnas, 25 amostras do aquífero Itararé, 15 amostras do aquífero Rio

Bonito, 5 amostras do aquífero Passa Dois, 65 amostras do aquífero Guarani (sendo 52 na região confinada) e 38 amostras do aquífero Caiuá satisfizeram os parâmetros de potabilidade e foram utilizadas para o cálculo do IRR com 8 parâmetros (cátions e ânions). Os 8 parâmetros utilizados para o cálculo do IRR foram: cloreto, fluoreto, sulfato, nitrato, nitrito, sódio, ferro total e manganês. Com os valores do IRR interpolados a análise foi realizada da mesma forma que nos demais parâmetros.

A análise da interpolação gerou as tabelas comparativas do comportamento das variáveis em cada interpolador por aquífero (Tabelas A3 a A8) e as figuras apresentam o resultado da interpolação, indicando onde ocorreram as estimativas tendenciosas e a apresentação dos mapas gerados com classes definidas em percentis, e ainda os valores medidos, estimados e percentual de variação de cada percentil apresentado (Figuras A3 a A9).

Nas tabelas A3, A4, A5, A6, A7 e A8 são apresentados os comportamentos de cada parâmetro em cada interpolador, com a indicação do número de dados que se comportaram com valores acima dos valores medidos e com valores abaixo dos valores medidos, além daqueles que apresentaram estimativas tendenciosas, ditas àquelas em que os valores estimados variaram mais que 10% dos valores originais.

Tabela A 3. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Furnas.

	Aquífero Furnas		Capacidade específica (m³ h⁻¹) m⁻¹		Condutividade hidráulica (m s⁻¹)		Espessura saturada (m)		Nível estático (m)		Transmissividade (m² s⁻¹)		Vazão (m³ h⁻¹)		Índice Relativo de Risco (adimensional)	
			36		22		36		36		22		36		8	
IDW	Número de dados (poços)															
	Estimativas positivas		15	42%	5	23%	13	36%	13	36%	7	32%	13	36%	5	63%
	Estimativas negativas		14	39%	4	18%	13	36%	13	36%	5	23%	13	36%	3	38%
	Variações iguais a 0%		7	19%	13	59%	10	28%	10	28%	10	45%	10	28%	0	0%
	Superestimativas		2	6%	4	18%	1	3%	3	8%	3	14%	2	6%	0	0%
	Subestimativas		2	6%	2	9%	3	8%	2	6%	1	5%	4	11%	0	0%
	Estimativas tendenciosas		4	11%	6	27%	4	11%	5	14%	4	18%	6	17%	0	0%
TN	Número de dados (poços)		27		13		27		27		13		27		3	
	Estimativas positivas		13	48%	5	38%	19	70%	10	37%	7	54%	15	56%	2	67%
	Estimativas negativas		14	52%	8	62%	8	30%	17	63%	6	46%	12	44%	1	33%
	Variações iguais a 0%		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Superestimativas		6	22%	1	8%	2	7%	3	11%	0	0%	9	33%	0	0%
	Subestimativas		4	15%	4	31%	2	7%	1	4%	3	23%	3	11%	0	0%
	Estimativas tendenciosas		10	37%	5	38%	4	15%	4	15%	3	23%	12	44%	0	0%
TTR	Número de dados (poços)		36		22		36		36		22		36		8	
	Estimativas positivas		15	42%	15	68%	17	47%	17	47%	13	59%	18	50%	5	63%
	Estimativas negativas		21	58%	7	32%	19	53%	19	53%	9	41%	17	47%	3	38%
	Variações iguais a 0%		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	3%	0	0%
	Superestimativas		7	19%	13	59%	2	6%	7	19%	11	50%	5	14%	1	13%
	Subestimativas		3	8%	7	32%	2	6%	4	11%	7	32%	4	11%	0	0%
	Estimativas tendenciosas		10	28%	20	91%	4	11%	11	31%	18	82%	9	25%	1	13%

Tabela A 4. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Itararé.

	Aquífero Itararé		Capacidade específica (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹		Condutividade hidráulica (m s ⁻¹)		Espessura saturada (m)		Nível estático (m)		Transmissividade (m ² s ⁻¹)		Vazão (m ³ h ⁻¹)		Índice Relativo de Risco (adimensional)	
IDW	Número de dados (poços)		169		75		167		169		75		169		25	
	Estimativas positivas		94	56%	12	16%	85	51%	92	54%	18	24%	86	51%	14	56%
	Estimativas negativas		72	43%	6	8%	69	41%	67	40%	19	25%	60	36%	11	44%
	Variações iguais a 0%		3	2%	57	76%	13	8%	10	6%	38	51%	23	14%	0	0%
	Superestimativas		7	4%	3	4%	8	5%	9	5%	4	5%	9	5%	0	0%
	Subestimativas		5	3%	2	3%	4	2%	7	4%	2	3%	6	4%	0	0%
	Estimativas tendenciosas		12	7%	5	7%	12	7%	16	9%	6	8%	15	9%	0	0%
TIN	Número de dados (poços)		158		63		156		158		63		158		19	
	Estimativas positivas		87	55%	41	65%	73	47%	89	56%	40	63%	88	56%	10	53%
	Estimativas negativas		71	45%	22	35%	83	53%	69	44%	23	37%	69	44%	9	47%
	Variações iguais a 0%		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	1%	0	0%
	Superestimativas		50	32%	21	33%	20	13%	44	28%	20	32%	42	27%	0	0%
	Subestimativas		15	9%	5	8%	15	10%	16	10%	5	8%	14	9%	1	5%
	Estimativas tendenciosas		65	41%	26	41%	35	22%	60	38%	25	40%	56	35%	1	5%
TTR	Número de dados (poços)		169		75		167		169		75		169		25	
	Estimativas positivas		82	49%	46	61%	91	54%	83	49%	42	56%	91	54%	15	60%
	Estimativas negativas		87	51%	29	39%	76	46%	86	51%	33	44%	77	46%	10	40%
	Variações iguais a 0%		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	1%	0	0%
	Superestimativas		26	15%	43	57%	14	8%	14	8%	41	55%	14	8%	2	8%
	Subestimativas		7	4%	28	37%	9	5%	8	5%	31	41%	9	5%	0	0%
	Estimativas tendenciosas		33	20%	71	95%	23	14%	22	13%	72	96%	23	14%	2	8%

Tabela A 5. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Rio Bonito.

	Capacidade específica (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹				Conductividade hidráulica (m s ⁻¹)		Espessura saturada (m)		Nível estático (m)		Transmissividade (m ² s ⁻¹)		Vazão (m ³ h ⁻¹)		Índice Relativo de Risco (adimensional)	
	61				46		61		61		46		61		15	
IDW	Número de dados (poços)															
	21	34%	1	2%	12	20%	21	34%	10	22%	17	28%	7	47%		
	13	21%	1	2%	16	26%	13	21%	6	13%	16	26%	8	53%		
	27	44%	44	96%	33	54%	27	44%	30	65%	28	46%	0	0%		
	1	2%	0	0%	1	2%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%		
	1	2%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	2%	0	0%		
	2	3%	0	0%	1	2%	0	0%	0	0%	1	2%	0	0%		
TIN	Número de dados (poços)				41		56		56		41		56		8	
	30	54%	22	54%	30	54%	30	54%	21	51%	32	57%	2	25%		
	26	46%	19	46%	26	46%	26	46%	20	49%	24	43%	6	75%		
	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%		
	8	14%	9	22%	5	9%	10	18%	11	27%	9	16%	1	13%		
	3	5%	5	12%	1	2%	5	9%	5	12%	1	2%	0	0%		
	11	20%	14	34%	6	11%	15	27%	16	39%	10	18%	1	13%		
TTR	Número de dados (poços)				46		61		61		46		61		15	
	25	41%	34	74%	26	43%	29	48%	30	65%	29	48%	7	47%		
	36	59%	12	26%	34	56%	32	52%	16	35%	29	48%	8	53%		
	0	0%	0	0%	1	2%	0	0%	0	0%	3	5%	0	0%		
	6	10%	31	67%	3	5%	2	3%	29	63%	5	8%	2	13%		
	4	7%	12	26%	2	3%	1	2%	14	30%	2	3%	0	0%		
	10	16%	43	93%	5	8%	3	5%	43	93%	7	11%	2	13%		

Tabela A 6. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Passa Dois.

Aquífero Passa Dois		Capacidade específica (m³ h⁻¹) m⁻¹		Condutividade hidráulica (m s⁻¹)		Espessura saturada (m)		Nível estático (m)		Transmissividade (m² s⁻¹)		Vazão (m³ h⁻¹)		Índice Relativo de Risco (adimensional)	
		94		78		95		95		78		94		5	
IDW	Número de dados (poços)	28	30%	3	4%	44	46%	24	25%	4	5%	21	22%	2	40%
	Estimativas positivas	17	18%	4	5%	41	43%	20	21%	8	10%	15	16%	3	60%
	Estimativas negativas	49	52%	71	91%	10	11%	51	54%	66	85%	58	62%	0	0%
	Variações iguais a 0%	5	5%	2	3%	5	5%	5	5%	2	3%	4	4%	0	0%
	Superestimativas	4	4%	2	3%	3	3%	3	3%	2	3%	4	4%	0	0%
	Subestimativas	9	10%	4	5%	8	8%	8	8%	4	5%	8	9%	0	0%
TN	Número de dados (poços)	88		73		89		89		73		88		2	
	Estimativas positivas	46	52%	42	58%	45	51%	47	53%	42	58%	51	58%	1	50%
	Estimativas negativas	42	48%	31	42%	44	49%	42	47%	31	42%	37	42%	1	50%
	Variações iguais a 0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Superestimativas	22	25%	16	22%	3	3%	10	11%	17	23%	10	11%	1	50%
	Subestimativas	1	1%	2	3%	3	3%	4	4%	2	3%	2	2%	0	0%
TTR	Estimativas tendenciosas	23	26%	18	25%	6	7%	14	16%	19	26%	12	14%	1	50%
	Número de dados (poços)	94		78		95		95		78		94		5	
	Estimativas positivas	46	49%	67	86%	48	51%	45	47%	71	91%	48	51%	4	80%
	Estimativas negativas	48	51%	11	14%	47	49%	50	53%	7	9%	46	49%	1	20%
	Variações iguais a 0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Superestimativas	23	24%	67	86%	5	5%	6	6%	70	90%	7	7%	0	0%
	Subestimativas	15	16%	10	13%	4	4%	4	4%	7	9%	5	5%	0	0%
	Estimativas tendenciosas	38	40%	77	99%	9	9%	10	11%	77	99%	12	13%	0	0%

Tabela A 7. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Guarani.

	Aquífero Guarani	Capacidade específica ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)		Condutividade hidráulica (m s^{-1})		Espessura saturada (m)		Nível estático (m)		Transmissividade ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)		Vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)		Índice Relativo de Risco (adimensional)	
		80		40		40		80		40		80		13	
IDW	Número de dados (poços)	28		2		1		6		2		22		7	
	Estimativas positivas	35%		5%		3%		8%		5%		28%		54%	
	Estimativas negativas	21		1		2		4		1		27		5	
	Variações iguais a 0%	31		37		37		70		37		31		1	
	Superestimativas	3		2		0		2		2		2		0	
	Subestimativas	3		1		0		2		1		3		0	
TIN	Estimativas tendenciosas	6		3		0		4		3		5		0	
	Número de dados (poços)	74		36		36		74		35		74		9	
	Estimativas positivas	42		25		19		43		18		49		5	
	Estimativas negativas	32		11		17		31		17		25		4	
	Variações iguais a 0%	0		0		0		0		0		0		0	
	Superestimativas	13		7		3		11		8		13		1	
TTR	Subestimativas	4		1		0		3		1		1		0	
	Estimativas tendenciosas	17		8		3		14		9		14		1	
	Número de dados (poços)	80		40		40		80		40		80		13	
	Estimativas positivas	41		25		13		43		25		41		7	
	Estimativas negativas	39		15		23		37		15		39		6	
	Variações iguais a 0%	0		0		4		0		0		0		0	
	Superestimativas	7		25		0		6		23		5		2	
	Subestimativas	6		14		2		3		14		5		1	
	Estimativas tendenciosas	13		39		2		9		37		10		3	
		16%		98%		5%		11%		93%		13%		23%	

Tabela A 8. Tabela comparativa do comportamento das variáveis em cada interpolador para o aquífero Caiuá.

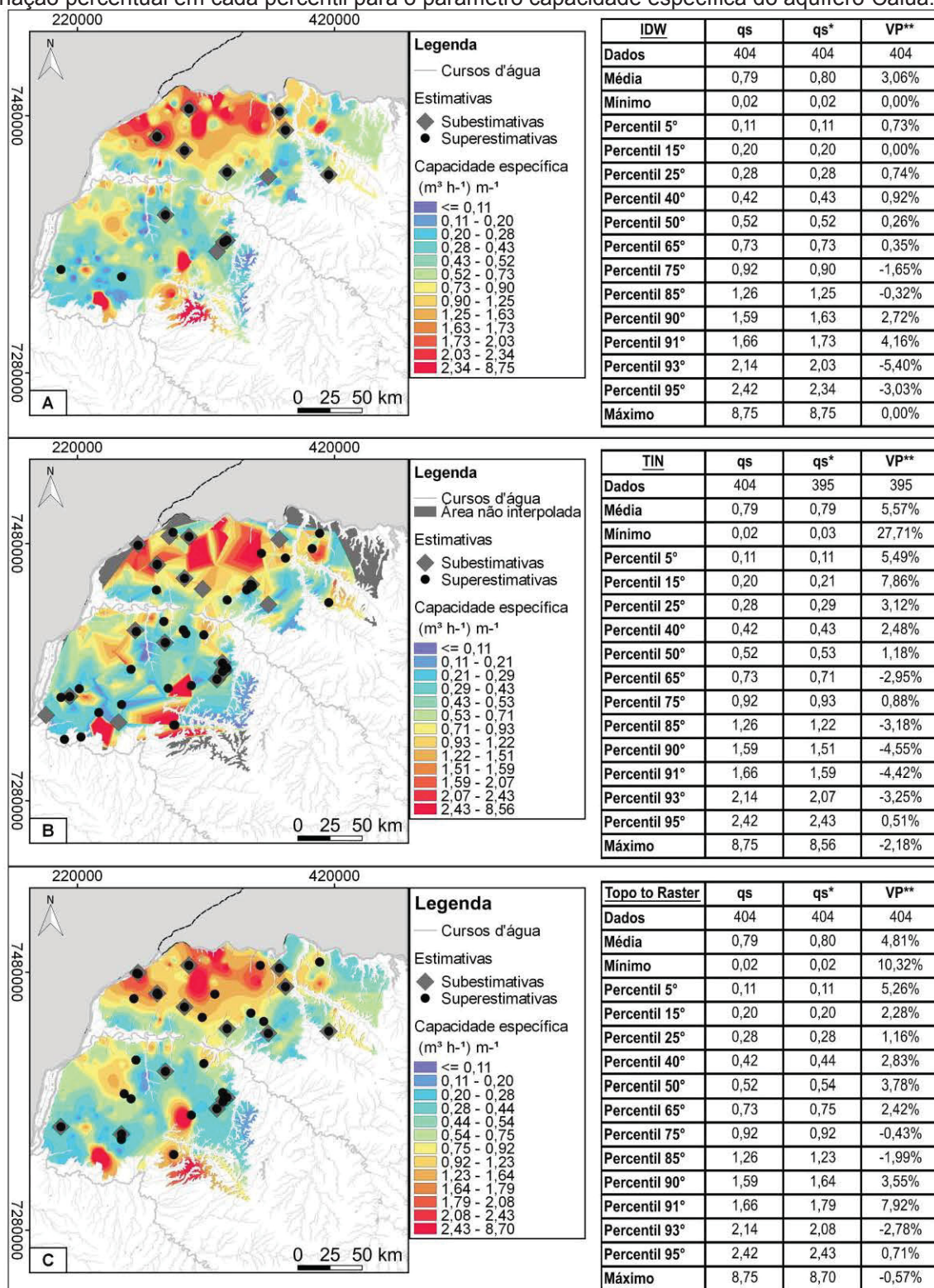
Aquifero Caiuá		Capacidade específica (m³ h⁻¹) m⁻¹		Condutividade hidráulica (m s⁻¹)		Espessura saturada (m)		Nível estático (m)		Transmissividade (m² s⁻¹)		Vazão (m³ h⁻¹)		Índice Relativo de Risco (adimensional)		
		404		32		399		404		32		404		38		
IDW	Número de dados (poços)		174	43%	0	0%	164	41%	143	35%	3	9%	193	48%	19	50%
	Estimativas positivas		126	31%	0	0%	118	30%	130	32%	2	6%	121	30%	19	50%
	Estimativas negativas		104	26%	32	100%	117	29%	131	32%	27	84%	90	22%	0	0%
	Variações iguais a 0%		13	3%	0	0%	16	4%	9	2%	0	0%	15	4%	0	0%
	Superestimativas		13	3%	0	0%	11	3%	7	2%	0	0%	13	3%	0	0%
	Subestimativas		26	6%	0	0%	27	7%	16	4%	0	0%	28	7%	0	0%
	Estimativas tendenciosas		395		27		390		395		27		395		33	
TIN	Número de dados (poços)		211	53%	14	52%	194	50%	202	51%	14	52%	211	53%	19	58%
	Estimativas positivas		184	47%	13	48%	196	50%	193	49%	13	48%	184	47%	14	42%
	Estimativas negativas		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Variações iguais a 0%		42	11%	2	7%	24	6%	33	8%	2	7%	45	11%	1	3%
	Superestimativas		18	5%	1	4%	12	3%	10	3%	1	4%	15	4%	0	0%
	Subestimativas		60	15%	3	11%	36	9%	43	11%	3	11%	60	15%	1	3%
	Estimativas tendenciosas		404		32		399		404		32		404		38	
TTR	Número de dados (poços)		243	60%	5	16%	225	56%	189	47%	4	13%	212	52%	23	61%
	Estimativas positivas		161	40%	27	84%	172	43%	213	53%	28	88%	191	47%	15	39%
	Estimativas negativas		0	0%	0	0%	2	1%	2	0%	0	0%	1	0%	0	0%
	Variações iguais a 0%		36	9%	5	16%	23	6%	30	7%	4	13%	34	8%	5	13%
	Superestimativas		15	4%	27	84%	20	5%	12	3%	28	88%	21	5%	0	0%
	Subestimativas		51	13%	32	100%	43	11%	42	10%	32	100%	55	14%	5	13%
	Estimativas tendenciosas		404		32		399		404		32		404		38	

Como exemplo de aplicação da rotina utilizada, será realizado o estudo no aquífero Caiuá, frente a seguintes justificativas:

- Dada a sua importância de abastecimento para a região, onde dos 109 municípios localizados sobre este aquífero, 65% destes captam água exclusivamente subterrânea e 13.7% captam água de forma mista;
- O trabalho utiliza dados com informações de subsuperfície e é apresentado na região de afloramento dos aquíferos, e o aquífero Caiuá possui a maior extensão em superfície e não é confinado por nenhuma outra unidade acima;
- Possui uma maior quantidade de poços disponíveis quando comparado aos demais aquíferos em estudo.

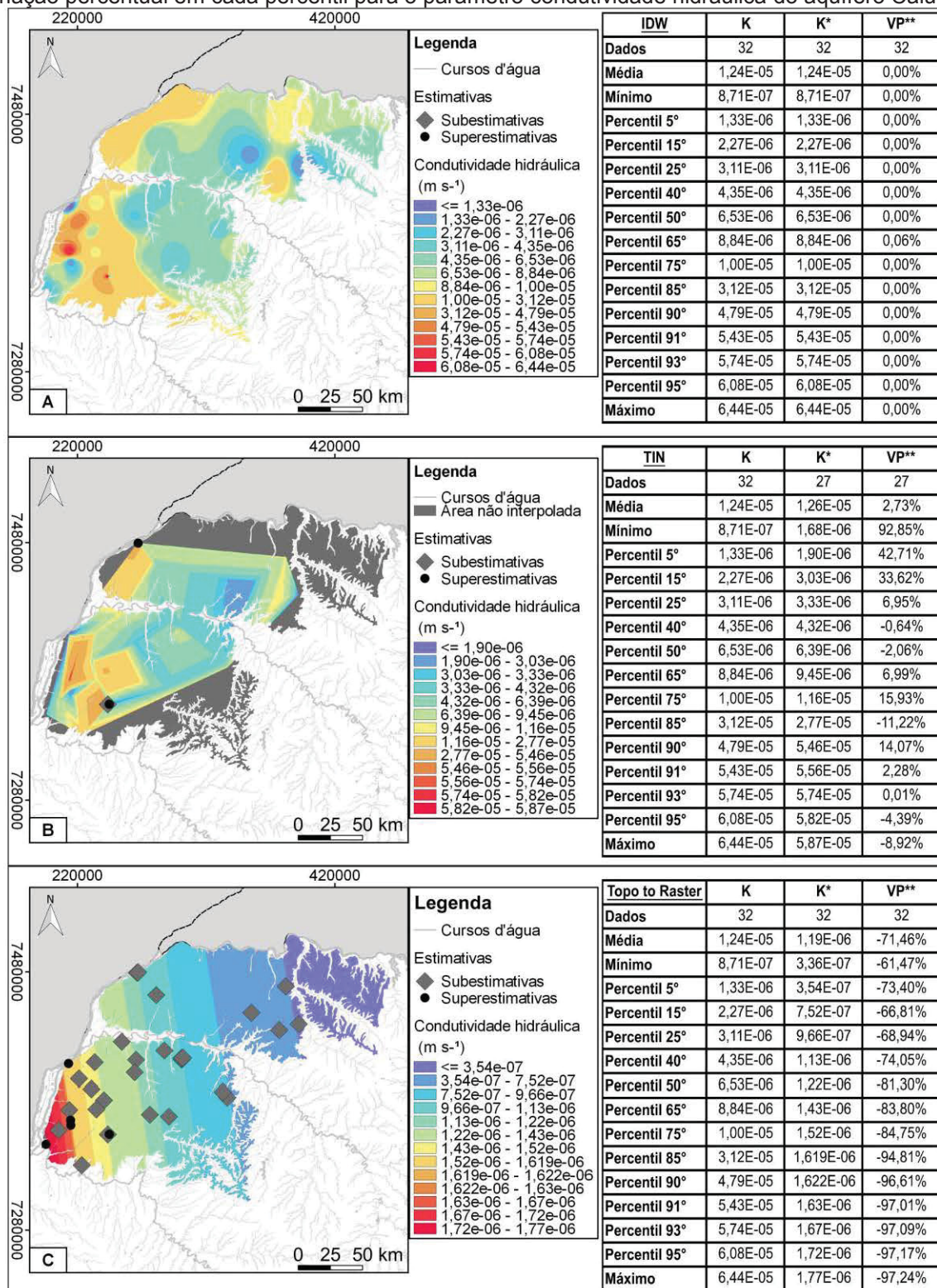
São então apresentados os mapas interpolados para o aquífero Caiuá para cada um dos interpoladores, com a localização dos dados em que ocorreram estimativas tendenciosas (Figura A3 a A9).

Figura A 3. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) *Topo to Raster*, com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro capacidade específica do aquífero Caiuá.



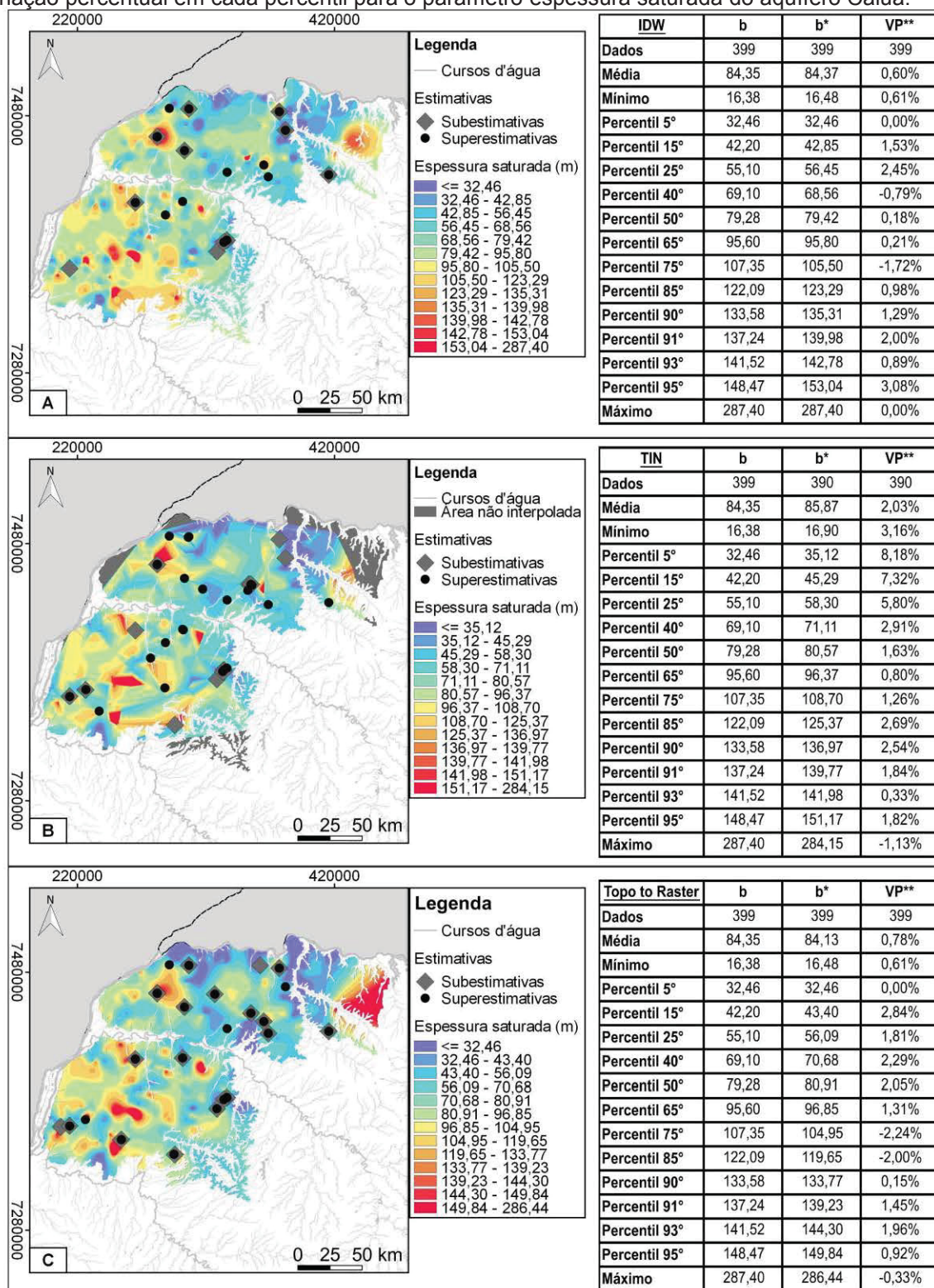
* Valor estimado ** Variação Percentual
qs = capacidade específica

Figura A 4. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) *Topo to Raster*, com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro condutividade hidráulica do aquífero Caiuá.



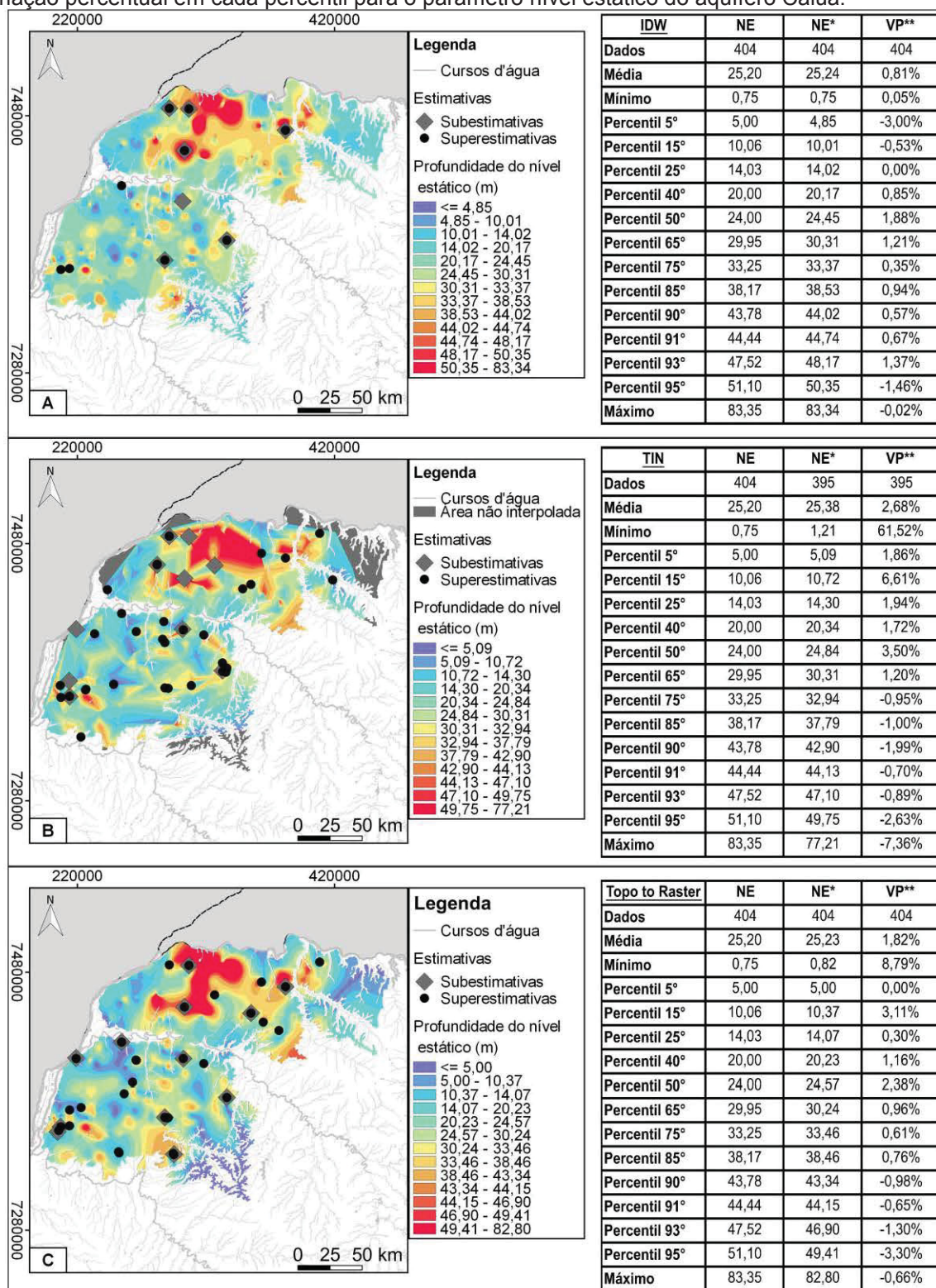
* Valor estimado ** Variação Percentual
K = condutividade hidráulica

Figura A 5. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) *Topo to Raster*, com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro espessura saturada do aquífero Caiuá.



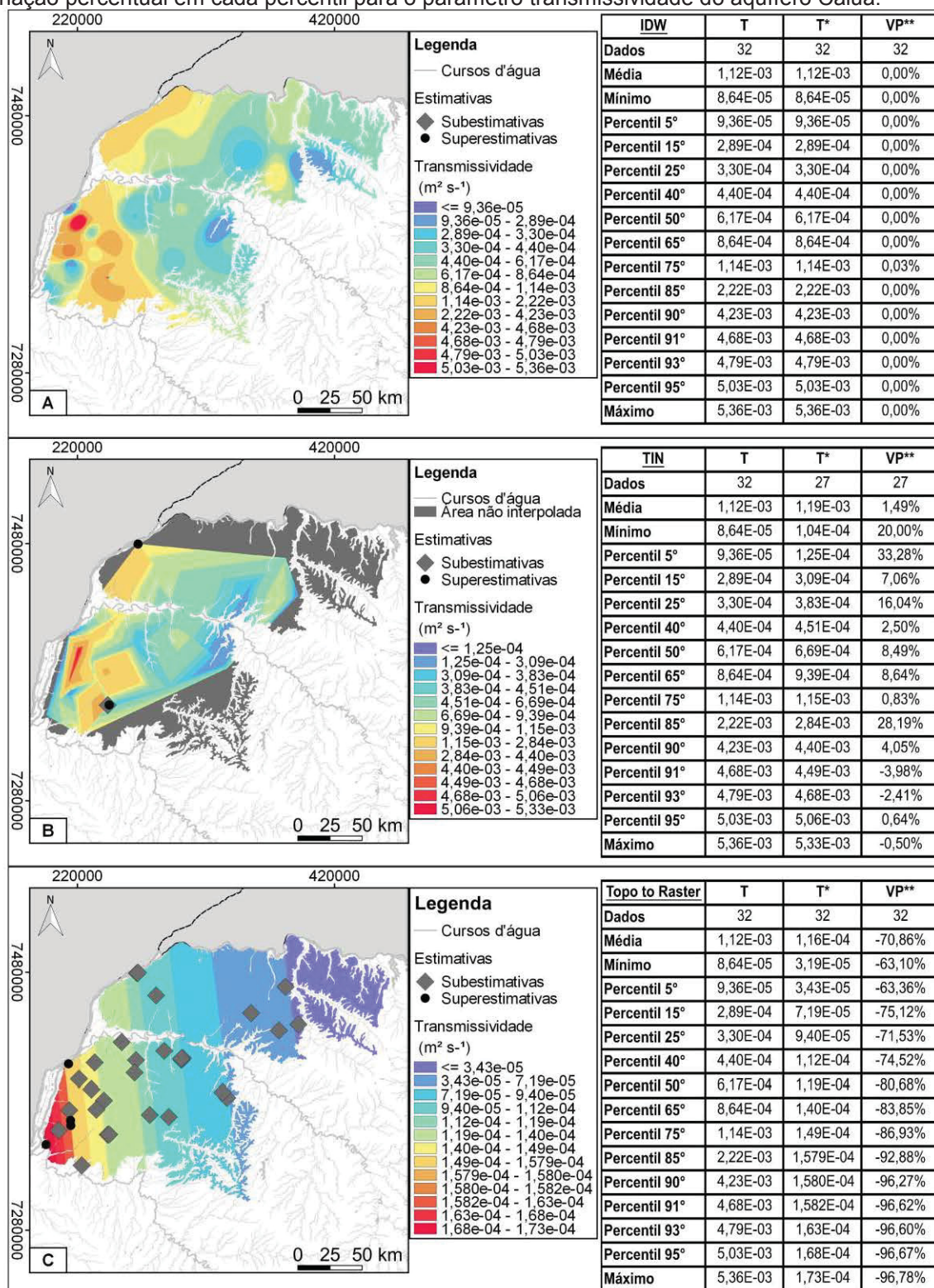
* Valor estimado ** Variação Percentual
b = espessura saturada

Figura A 6. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) *Topo to Raster*, com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro nível estático do aquífero Caiuá.



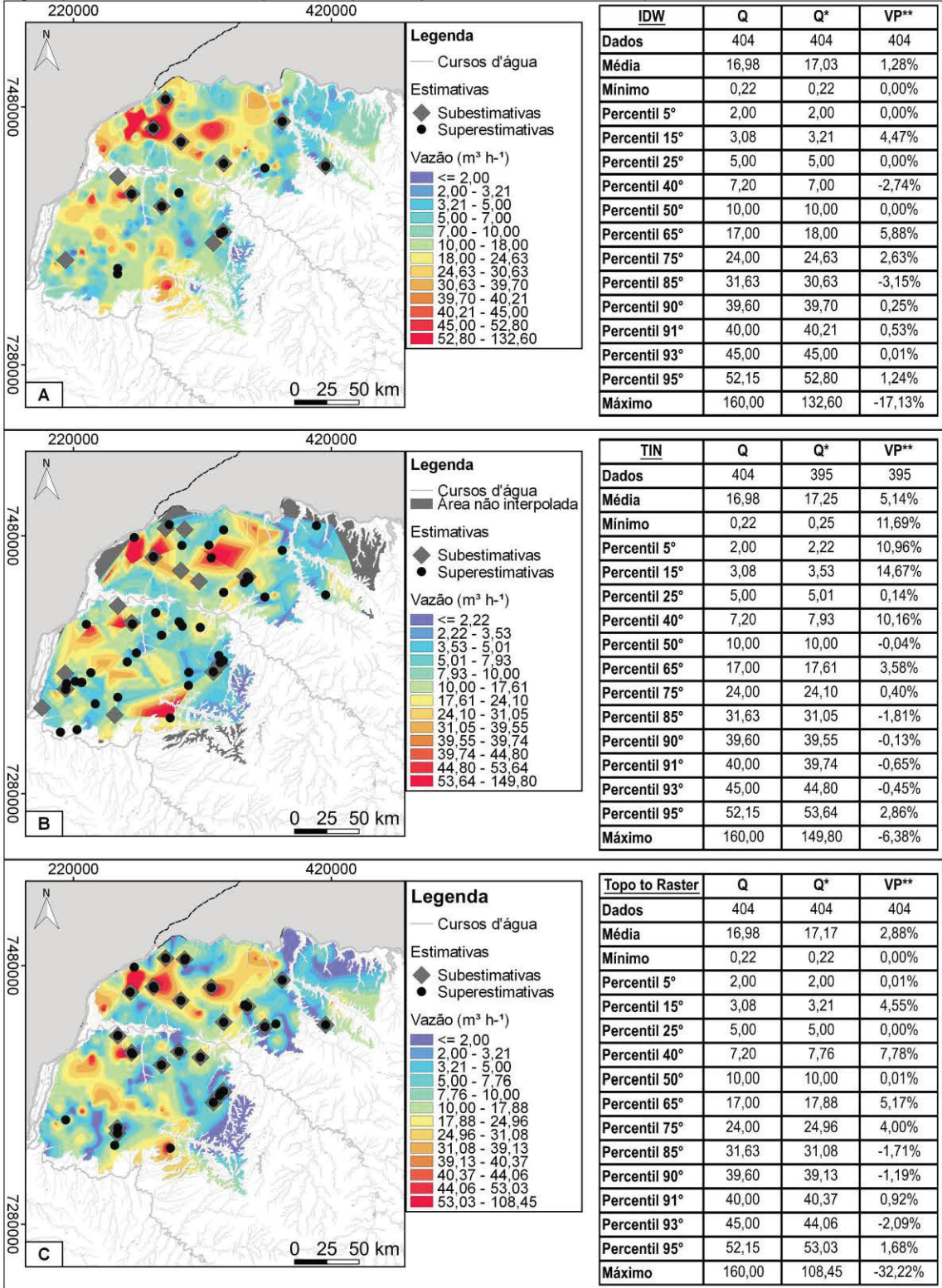
* Valor estimado ** Variação Percentual
NE = nível estático

Figura A 7. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) *Topo to Raster*, com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro transmissividade do aquífero Caiuá.



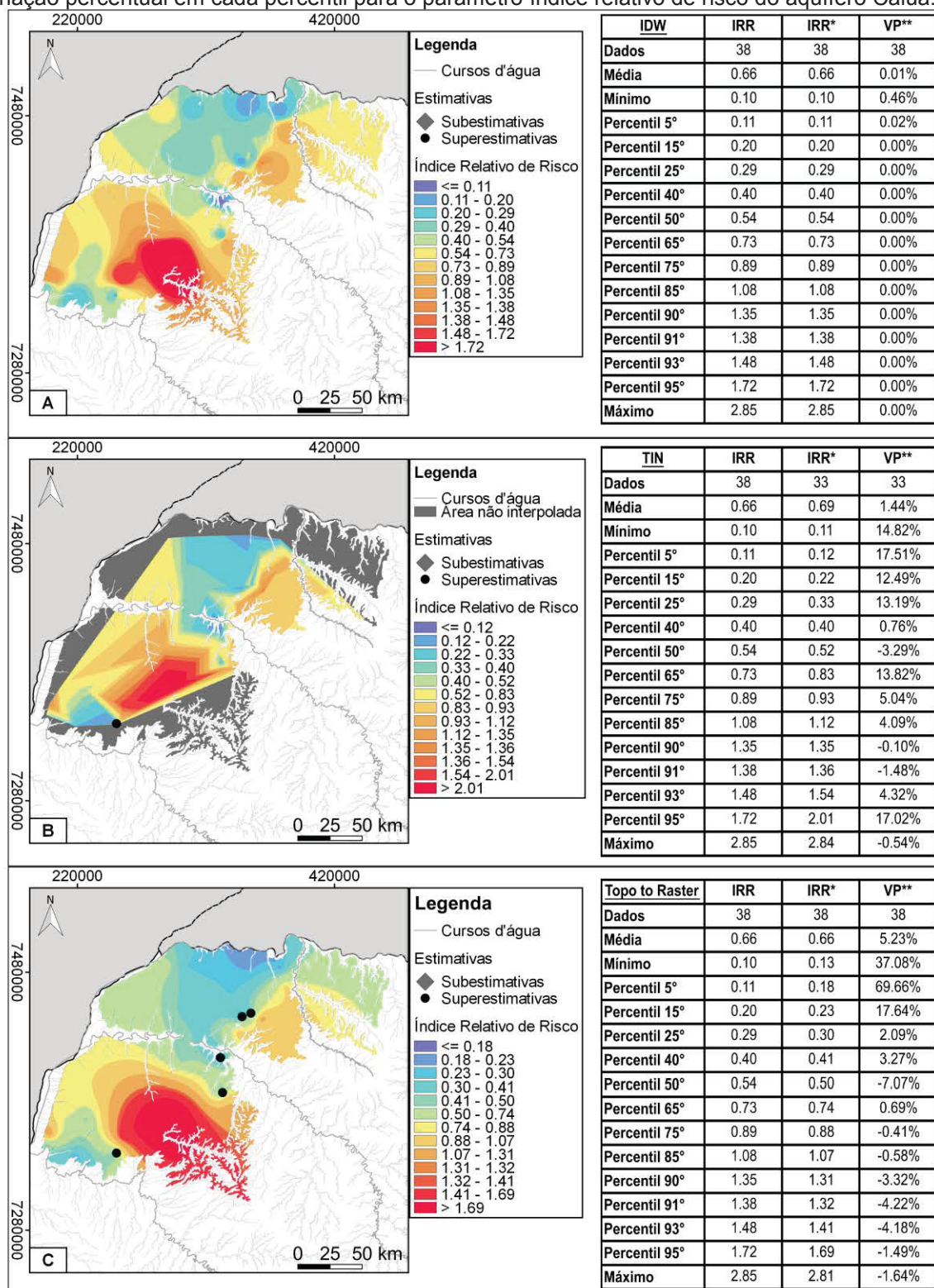
* Valor estimado ** Variação Percentual
T = transmissividade

Figura A 8. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) *Topo to Raster*, com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro vazão do aquífero Caiuá.



* Valor estimado ** Variação Percentual
Q = vazão

Figura A 9. Mapas gerados através dos interpoladores (A) Inverso da distância ponderada, (B) Triangulação e (C) *Topo to Raster*, com as classes em percentis e apresentação dos dados com estimativas tendenciosas, e na tabela ao lado do mapa a indicação do valor medido, estimado e variação percentual em cada percentil para o parâmetro índice relativo de risco do aquífero Caiuá.



* Valor estimado ** Variação Percentual
IRR = Índice Relativo de Risco

Foi observado que o interpolador TIN não utilizou todos os dados no processo de interpolação, além de não extrapolar a estimativa para a área aflorante do aquífero, como pode ser observado nas Figuras 3B a 9B. Esse fato ocorreu em todas os aquíferos e em todos os parâmetros estimados, além disso foi um interpolador que não gerou resultados próximos aos valores medidos.

Embora a análise não tenha se baseado na qualidade do mapa gerado e sim nos valores estimados, se observou que quando utilizado o interpolador *Topo to raster* foram construídas superfícies mais suaves. No entanto, as variações que são observadas entre os valores medidos e os valores estimados foram grandes, especialmente nos valores de condutividade hidráulica e transmissividade em que as estimativas tendenciosas ocorreram em mais de 90% desses dados (Tabelas A3 a A8).

O interpolador IDW gerou mapas com superfícies menos suaves que o interpolador *Topo to raster*, apresentando o efeito conhecido como mira ou *bull's eyes* (onde são geradas superfícies concêntricas ao redor dos pontos de estimativa). Todavia, os valores apresentados por esse interpolador foram melhores que os apresentados pelos outros interpoladores por apresentar menos estimativas tendenciosas e menores variações entre os valores (Tabelas A3 a A8).

Os valores com variações iguais a 0% entre os valores medidos e os valores estimados ocorreram em todos os parâmetros, variando de 7.7% a 100% dos dados dependendo da variável. No geral, baixos valores tenderam a aumentar e altos valores tenderam a diminuir, mas as menores variações entre os valores reais e os valores estimados ocorreram utilizando o interpolador IDW.

A razão de realizar a análise de erro nas interpolações, a porcentagem e representação espacial das regiões/poços que apresentaram maiores variações é para se entender qual o efeito da interpolação em dados hidrogeológicos. Os interpoladores utilizados são tidos na literatura como interpoladores exatos que ao interpolar dados apresentariam o mesmo valor do dado original de mesma localização, no entanto, a distribuição espacial irregular dos poços e a variabilidade dos dados no espaço influencia a exatidão destes.

O que se observa é a variação entre regiões de altos, médios e baixos valores não coincidirem entre variáveis que foram calculadas utilizando o mesmo parâmetro, como é o caso da vazão e capacidade específica, e espessura saturada e profundidade do nível estático.

O cálculo do parâmetro capacidade específica é realizado através da razão entre a vazão e o rebaixamento obtido no teste de bombeamento. Dito isso, a diferença ou variação, entre as áreas mais ou menos potenciais foi influenciada pelo valor do rebaixamento.

A espessura saturada foi calculada através da diferença entre a profundidade do poço e o nível estático. Entre essas duas variáveis também ocorre essa diferença de regiões e nesse caso a influência foi da profundidade do poço. Cabe um adendo, que em alguns poços do aquífero Guarani o valor da espessura saturada considerado é equivalente à espessura perfurada dentro da unidade.

A condutividade hidráulica foi calculada com base na transmissividade durante o teste de aquífero e foi utilizada a mesma espessura saturada obtida no teste de bombeamento. Essas duas variáveis não apresentam a variação que foi observada nas demais variáveis e quando ocorriam eram em áreas menores.

3.1.5 Considerações finais

O estudo apresentado avaliou a interpolação em parâmetros hidrogeológicos de aquíferos sedimentares no estado do Paraná, sendo que esses parâmetros são compostos por valores de capacidade específica, condutividade hidráulica, espessura saturada, nível estático, transmissividade, vazão e o índice relativo de risco.

O interpolador IDW foi o mais preciso em todos os aquíferos e em todos os parâmetros hidrogeológicos, pois apresentou estimativas tendenciosas em apenas 7% dos dados, onde algumas estimativas tendenciosas ocorriam em poços de mesma localização para parâmetros diferentes e essa ocorrência de maiores erros em poços de mesma localização se deve a proximidade de valores muito altos próximos a valores mais baixos.

O interpolador *Topo to Raster* embora tenha gerado superfícies mais suaves, resultou em uma maior quantidade de dados com estimativas tendenciosas. Já a TIN, foi o método que gerou piores resultados pois tem a característica de não extrapolar além do limite dos dados de entrada e resultou em maiores erros nas estimativas.

Esse trabalho contribui para estudos de espacialização de parâmetros hidrogeológicos com uma análise de mais rápido processamento, possibilitando a

obtenção de estimativas em locais não amostrados mais próximos dos valores medidos. Espacializar parâmetros hidrogeológicos é uma importante ferramenta para se gerenciar os recursos hídricos subterrâneos e assim ter um melhor planejamento dadas as ocorrências desses recursos.

3.1.6 Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH) pela infraestrutura e apoio institucional à pesquisa.

3.1.7 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**: regiões hidrográficas brasileiras. Brasília - DF: ANA, 2014. Relatório Pleno - edição especial.

ARCGIS. 2018. **Topo to raster**. Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/tools/spatial-analyst-toolbox/topo-to-raster.htm>. Acesso em: 15 maio 2018.

ATHAYDE, C. M.; ATHAYDE, G. B.; LICHT, O. A. B.; ROSA FILHO, E. F. da. Índice Relativo de Risco, ferramenta de tomada de decisão em bacias hidrográficas destinadas ao abastecimento público. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 71, n. 1, p. 21-36, 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Ministério da saúde, Brasília, DF, 28 set. 2017. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministério da saúde, Brasília, DF, 12 dez. 2011. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Carta das águas subterrâneas do Paraná**: resumo executivo. Brasília: MMA, 2015.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). **ARCGIS 10.5**.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. (Coord.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FERNANDES, L. A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP)**: os grupos Bauru e Caiuá. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 717-728, 2000.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). **Boletim de geociência das Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2/4, p. 147-191, 1988.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences**, n. 32, p. 1283-1298, 2006.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ (AGUASPARANA). **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Curitiba: AGUASPARANA, 2010. Relatório executivo.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Paraná**: população. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/panorama>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

LI, J.; HEAP, A.D. **A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists**. Geoscience Australia, Record 2008/23, 137 pp.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R. de; MELO, D. C. R. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 4, p. 793-804, 2011.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G. de; SOUZA, P. A. de; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

QGIS Development Team: Open Source Geospatial Foundation Project. **QGIS 2.18 "Las Palmas"**. Disponível em: <<https://www.qgis.org/>>.

QGIS. 2018. **Análise espacial:** interpolação. Disponível em: <https://docs.qgis.org/2.14/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html>. Acesso em: 15 set. 2017.

ROSSITER, D.G. Methodology for Soil Resource Inventories: Lectures notes. 2 ed. **International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences**: 2000.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. p. 41-65.

3.2 Analytic Hierarchy Process and map algebra for the definition of groundwater potential areas in sedimentary aquifers

The article will be submitted for *Water Resources Management*.

Abstract. The definition of potential areas for groundwater catchment has been discussed in many works due to water scarcity and even the necessity to obtain information from underground reserves, and the difficulty is to obtain subsurface information that indicates the availability and movement groundwater resources. The work aims to define potential areas for the catchment of groundwater in sedimentary aquifers in the state of Paraná and to elaborate a method using hydrogeological parameters with the application of Geographic Information Systems tools and multicriteria analysis. The result of this work was the definition of potential areas in four classes of potentiality: low, moderate, high and very high using hydrogeological parameters: specific capacity, hydraulic conductivity, saturated thickness, static level, transmissivity, flow and relative risk index. The predominant class in all the aquifers was high potential, occurring in 44% to 84% in the outcropping area of the aquifers in the study, and the variables that most influenced the potential were: hydraulic conductivity and transmissivity. The Caiuá and Rio Bonito aquifers are among those studied the ones with the greatest extension from high to very high surface potential. While the Passa Dois and Caiuá aquifers add up to the greatest extent on low to moderate potential surface. The water demand in the state is supplied in the regions by the superficial water availability, however it is observed that in places of low surface water availability the predominant type of catchment for supply is through the underground spring. Or when there is low underground water availability the predominant type of catchment is through surface water. Such information can be used for the management of groundwater and surface water in the state of Paraná.

Keywords. Hydrogeology, Potential Areas, Paraná Basin, Bauru Basin.

3.2.1 Introduction

Groundwater is important to the economy, to the society and to the environment. The increasing demand for this resource brings the necessity for methods that contribute to its management. In the last full report of National Water Agency (ANA) broaches a transition from management: from crisis management to risk management. The crisis management that is being used in Brazil is aggravated by the increasing pressure on water resources, mainly related to water demand and availability, moreover, to affect all practices of water and at all scales, implying emergency measures (ANA, 2017). Thus, understanding how underground water behavior, availability, and variability is necessary to apply the transition to risk management. This study aims to define potential areas for the catchment of groundwater in sedimentary aquifers using hydrogeological parameters of wells, applying Geographic Information Systems tools and the Analytic Hierarchy Process (AHP).

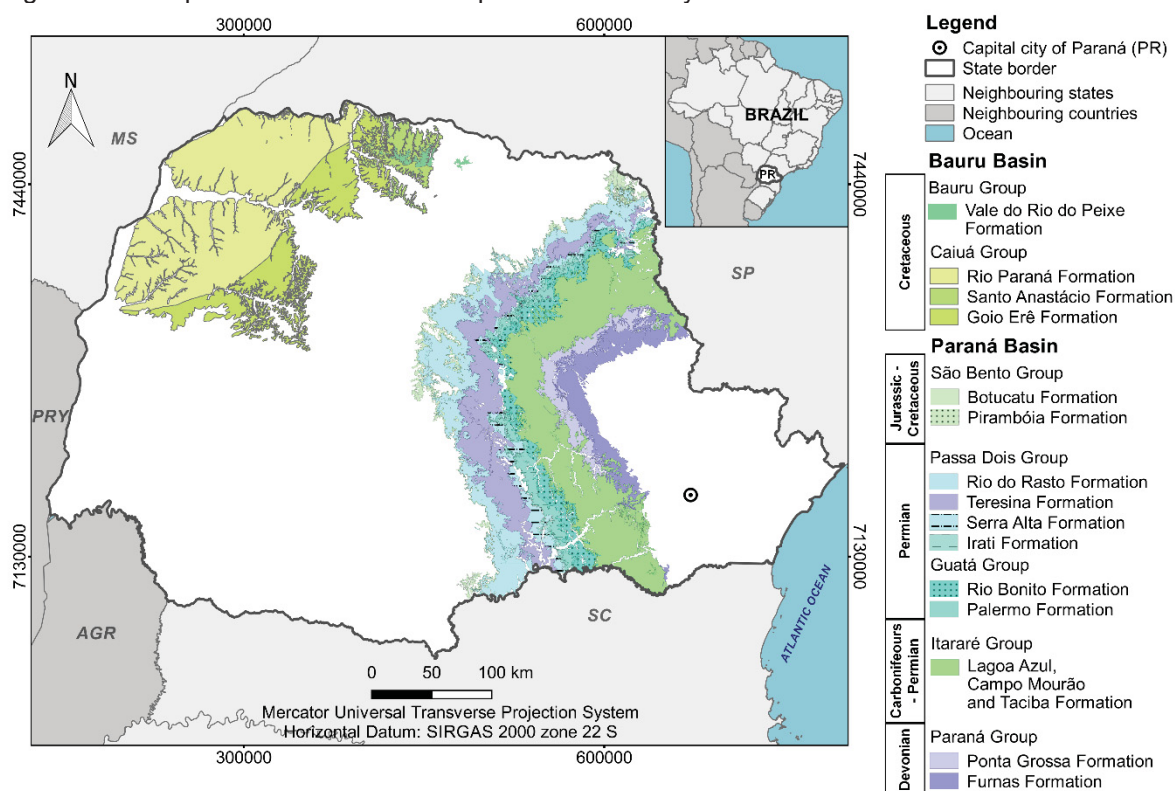
Many studies have used GIS with thematic layers such as use and land cover, slope, lithology, soil, geomorphology, drainage pattern and lineament pattern, applying AHP for groundwater potential mapping (RIBEIRO et al., 2010; FASHAE et al., 2014; PINTO et al., 2017). Other studies have used personal judgments to assign a weight (KUMAR et al., 2009; AVTAR et al., 2010; MANAP et al., 2013) and applied other multi-criteria decision analysis to hierarchy these layers, such as weight-of-evidence (CORSINI et al., 2009; OH et al., 2011).

Works such as these use surface data and to validate the result are used hydrogeological data from wells, especially data on specific capacity. In the work of Ribeiro et al. (2010) also used flow data to define potential areas, which differs from the factors used not only in the AHP method in other studies but also in other types of multicriteria analysis. The use of the flow parameter according to the authors has fundamental importance, since it reveals directly the aquifer potentiality, besides also having the second major weight in the definition of potential areas by the AHP method. The proposal to apply these tools to hydrogeological data aims to reduce the subjectivity of the definition of potential areas because these data directly indicate the potentiality of the aquifer.

3.2.2 The study area

The aquifers under study (Figure B1) extend over a surface area of 64 000 km² in the state of Paraná, which is situated in the southern region of Brazil and is between the longitudes 48° 25' 00" and 54° 50' 00" W and latitudes 22° 35' 00" and 26° 30' 00" S. This state is located in the Paraná hydrographic region, which is a region of great economic development and with the greatest population density of the country, besides having the greatest demands for water resources (ANA, 2014). In the state of Paraná, the water availability in 2010 was 299 888 Ls⁻¹ and the water demand was 51 364 Ls⁻¹ to supply public (42%), industrial (24%), agricultural (21%) and farming sector (13%), according to the State Plan of Water Resources of Paraná of 2010 (AGUASPARANA, 2010).

Figure B 1 - Map of the location of the aquifers under study.



3.2.2.1 Geology and hydrogeology in the study area

The rocks that compose the aquifers are part of two sedimentary basins that occur a great extent in Brazil. The Paraná Basin, which is a Neoproterozoic basin, is composed of rocks that correspond to Paleozoic transgressive-regressive cycles and also Mesozoic continental cycles with associated igneous rocks (MILANI et al.,

2007), and the Bauru Basin, Neo Cretaceous, that developed after the Serra Geral volcanism where new sedimentation conditions were created in a depression with distinct geological evolution of the Paraná Basin (FERNANDES, 1992). The aquifers in this study are Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani, and Caiuá, and their lithological and flow characteristics are presented in Table B1.

Table B 1 - Table with the geological characteristics and flows of the aquifers under study.

Aquifer	Lithology	Flow (m ³ h ⁻¹)	
		Minimum	Maximum
Furnas	Medium to coarse sandstones, where their thickness in the subsurface is of up to 300 m and in the surface of up to 200 m.	1.00	175.00
Itararé	Sandstones, siltstones, and lamites, where their thickness exceeds 1 300 m in the subsurface.	0.18	70.00
Rio Bonito	Sandstones, argillites and a sandy-clayey portion, where the main beds of coal are explored in the Paraná Basin, and its thickness is approximately 300 m in the surface.	1.00	132.50
Passa Dois	Argillites, shales, and siltstones, associated with limestone levels, where the highest recorded thickness was 318 m.	0.50	30.00
Guarani	Fine to medium sandstones, locally occurring clayey sandstones and coarse to conglomerates sandstones, where the thickness varies from 50 m and 800 m.	2.50	470.00
Caiuá	Very fine to fine sandstones, where the highest thickness recorded in the subsurface is 277 m.	0.22	160.00

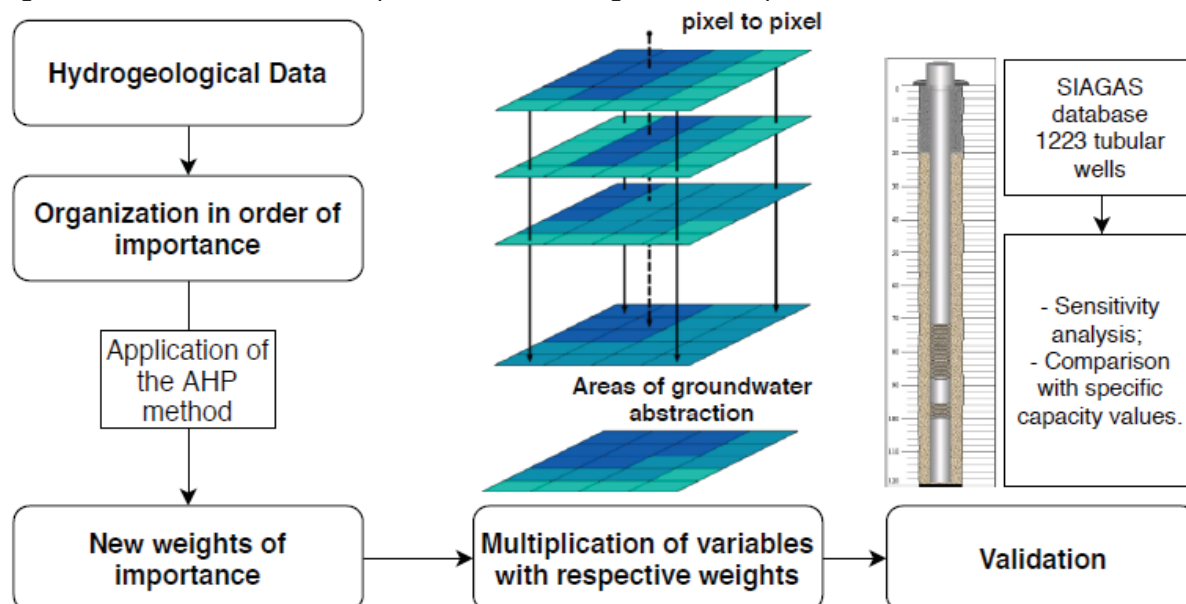
Source: SCHNEIDER et al. (1974); FRANÇA; POTTER (1988); FERNANDES; COIMBRA (2000); BRASIL (2015).

3.2.3 Material and Methods

The database used for the hydrodynamic characterization of the aquifers belongs to the Ministry of the Environment (BRASIL, 2015) and consists of hydrodynamic and hydrochemical information from deep tubular wells of the sedimentary aquifers: Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani and Caiuá. The hydrogeological parameters were interpolated using the Inverse Distance Weighted (IDW) interpolator in the GIS (Geographical Information System) Qgis 2.18 for spatialization in the outcrop region of the aquifers. Thus, seven thematic maps were used in each one of the aquifers of the parameters of specific capacity, hydraulic conductivity, saturated thickness, static level, transmissivity, flow and relative risk index (IRR) for the elaboration of the method to define potential areas for the catchment of groundwater. And for the validation of the results were used specific

capacity data of the Groundwater Information System (SIAGAS). The steps of this work are presented in Figure B2.

Figure B 2 - Flowchart of the steps for definition the groundwater potential zones.



3.2.3.1 Assignments of weights, Analytic Hierarchy Process, and Map Algebra

The AHP developed by Satty (1990) was the multicriteria analysis used to assign weights to hydrogeological parameters and their characteristics were used to identify the potentialities of groundwater catchment. The AHP is a matrices-based method where the user is allowed to assign the weights according to multiple criteria in order to hierarchize them due their importance to the objective and then apply in method to assign more consistent weights in relation to objective, in addition is possible to verify the consistency of the weights assigned at the end of the process.

Hydrogeological parameters were weighed from 1 to 9 on the Saaty scale (1990) according to the relevance of the variable to the proposed objective (Table B2).

Table B 2 - Importance scale for attribution of weights of Saaty (1990).

Degree of importance	Extreme	Very strong	Essential or strong	Moderate	Equal	Moderate	Strong	Very strong	Extreme
Scale	1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9

These weights were then normalized by the AHP method, where the comparison matrices were constructed in a spreadsheet editor and the consistency indices were computed in the same environment. Consistency indexes were calculated following the Saaty (1990) procedure to indicate the reliability of the weights assigned based on the following relationships:

$$\text{Consistency Index (CI)} = \frac{(\lambda_{\text{máx}} - n)}{(n-1)} \quad (7)$$

$$\text{Consistency Ratio (CR)} = \frac{\text{IC}}{\text{RI}} \quad (8)$$

Where the Consistency Index (CI) reflects the relationship between the comparison matrix and the number of pairs compared, the Random Consistency Index (RI) is a mean CI value for random matrices (Table B3) and the Consistency Ratio (CR) indicates the order of consistency of the assigned values, and the CR value should be less than 0.10 for consistent weights and otherwise the weights assigned at the first moment should be revalued.

Table B 3 - Random Consistency Index, where **n** is the number of variables in the process.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random Consistency Index (RI)	0	0	0.59	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

The weights given to hydrogeological parameters according to the Saaty (1990) scale according to the relevance to the definition of potential areas for groundwater catchment are presented in Table B4 and the reason for their attribution is in the following paragraphs:

- The hydraulic conductivity, transmissivity, and specific capacity are of close importance, however, the specific capacity presents in a less robust the productivity of the aquifer. While hydraulic conductivity and transmissivity observe the lowering effect in neighboring wells, the specific capacity observes in one well the lowering of this while pumped. Hence the importance given to the first two, hydraulic conductivity and transmissivity, is greater than for the specific capacity, and greater when compared to the flow since this will depend on the type of pump used;

- The saturated thickness and the static level are not variables that directly indicate the productivity of an aquifer, but that elucidate it. The higher the saturated

thickness, the greater the amount of water present. The lower the static level, the easier the catchment will be. Thus, these two variables are less important than the others, but they are still important. The saturated thickness is also more important than the static level for the definition of productivity.

- The Relative Risk Index (ATHAYDE et al., 2014), it is not indicative of aquifer productivity but is an important index as to the water quality that will be captured. And in this case, it is an important parameter for capturing water for population supply, providing information from regions with a greater toxicological risk.

Table B 4 - Matrix of comparison with the variables under study.

Parameters	K	T	qs	Q	NE	b	IRR
Hydraulic conductivity (K)	1	1.00	2.00	3.00	3.00	7.00	2.00
Transmissivity (T)	1	1	2.00	3.00	3.00	7.00	2.00
Specific capacity (qs)	0.50	0.50	1	2.00	2.00	4.00	2.00
Flow (Q)	0.33	0.33	0.50	1	2.00	4.00	2.00
Static level (NE)	0.33	0.33	0.50	0.50	1	4.00	2.00
Saturated thickness (b)	0.14	0.14	0.25	0.25	0.25	1	2.00
Relative risk index (IRR)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1

The weights assigned to the maps of each variable are presented in Table B5, indicating that the variables that have the greatest relevance are hydraulic conductivity and transmissivity, with 0.26, and the least significant variable is the saturated thickness, with 0.04. Also according to the AHP method, the normalization of these weights is coherent because it presents CR with a value equal to 0.068.

Table B 5 - Standard weights of each parameter according to Saaty's AHP method (1990).

Parameters	Relative Priority
Hydraulic conductivity	0.26
Transmissivity	0.26
Specific capacity	0.16
Flow	0.12
Static level	0.10
Relative risk index	0.07
Saturated thickness	0.04

At the end of the process, the maps of each parameter were inserted in the GIS QGIS 2.18 to generate the map of potential areas of groundwater catchment for the six aquifers. Groundwater potential zones (GPZ) were computed using the Raster

Calculator tool, where the maps of each parameter were multiplied to the respective weights previously normalized by the following equation given in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$:

$$\text{GPZ} = \frac{\left\{ \sqrt[4]{[(K * 0.26 * 3600) * (T * 0.26 * 3600) * (q_s * 0.16) * (Q * 0.12)]} * \frac{(b * 0.04)^2}{(NE * 0.1)} \right\}}{(\text{IRR} * 0.07)} \quad (9)$$

Where K is the hydraulic conductivity, T is the transmissivity, q_s is the specific capacity, Q is the flow, b is the saturated thickness, NE is the static level and the IRR is the relative risk index. Hydraulic conductivity and transmissivity were presented on a map with the units: m s^{-1} and $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, respectively, and multiplied by 3600 to move to the units: m h^{-1} and m h^{-1} respectively. If all variables have the same units, this transformation does not have to occur.

The classes of the GPZ map were defined according to the results observed in the aquifers. Since values below $2 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ are of low potential, between 2 and $10 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ are of moderate potential, between 10 and $100 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ are of high potential and greater than $100 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ are of very high potential.

For validation were used data from wells of the SIAGAS database, with hydrodynamic information of specific capacity.

3.2.4 Results and discussion

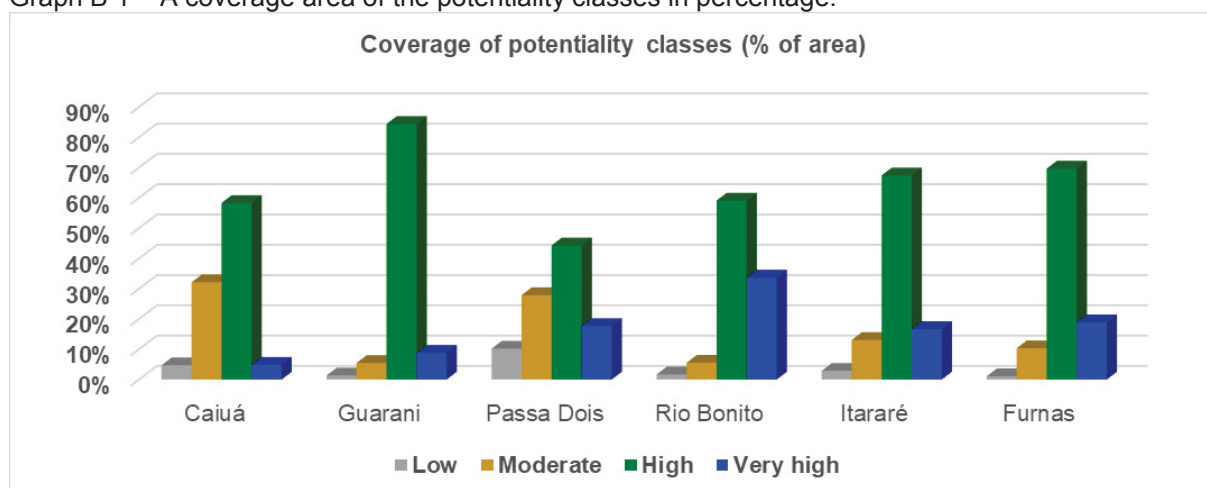
Based on the weights attribution and normalization to the definition of favorable areas for groundwater catchment, it was delimited four potential zones: low, moderate, high and very high, where the extent of each class in each aquifer can be seen in Table B6 and in Graph B1.

Table B 6 - Classification of potential areas and coverage area.

Potentiality Aquifers	Low		Moderate		High		Very high	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Caiuá	1171	5%	7948	32%	14429	58%	1205	5%
Guarani	26	1%	105	5%	1616	84%	168	9%
Passa Dois	1730	10%	4721	28%	7506	44%	2988	18%
Rio Bonito	44	2%	143	6%	1518	59%	865	34%
Itararé	412	3%	1872	13%	9665	67%	2392	17%
Furnas	46	1%	431	10%	2899	70%	788	19%
Total area	3428		15219		37633		8406	

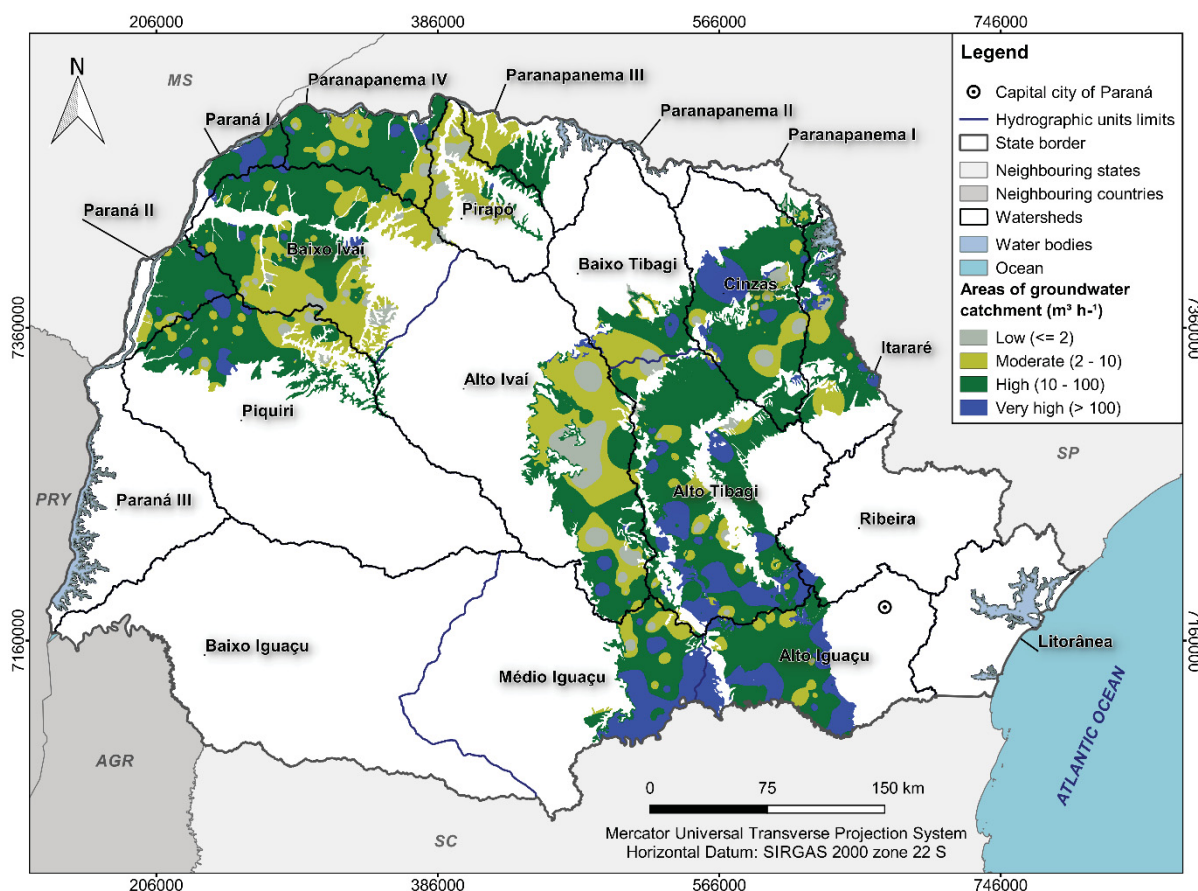
* Total aquifer area is 64686 km²

Graph B 1 – A coverage area of the potentiality classes in percentage.



The predominant class in all the aquifers is the high potential, being that in the aquifer Guarani its coverage is of more than 80% of the area. This aquifer has the smallest outcrop extension, with 1 915.28 km², but has the highest average flow rate among the aquifers studied. The Passa Dois aquifer has the greatest extension of low potential, with 1 730 km² and greater extension of very high potential, with 2 988 km². However, this aquifer has the lowest average flow rate among the studied aquifers. The Caiuá aquifer is the one with the greatest extension of moderate potential, 7 948 km², and it is still the highest extension of high potential, with 14 429 km² (Figure B3).

Figure B 3 - Map of groundwater potential areas of the aquifers studied in the state of Paraná.



The Caiuá aquifer presented as a predominant class the high potential, occupying an area of 14429 km² and this aquifer outcrops to the northwest of the state of Paraná in an area of 24753 km². The region of greatest water potential according to the proposed method is located to the west of the aquifer, mainly in the northwest and southwest portion. The northern outcrop region has a higher very high potential area when compared to the southern region, which has a higher toxicological risk according to IRR values.

Comparing to SIAGAS database, the specific capacity data has the highest potential wells in the northern region of the outcrop region (Figure B4). It was possible to compare these data punctually to all the classes defined by the method and to observe the increase of the values of specific capacity as the potential of the aquifer increases. Also, low values of specific capacity, hydraulic conductivity, saturated thickness, transmissivity and flow, and high values of static level and relative risk index were correlated to the classes of low potential and as the values of specific capacity, hydraulic conductivity, thickness the correlation increases with the

higher potential classes, corroborating with what is expected of the potentiality relationships (Table B7).

Figure B 4 - Map of groundwater potential areas in the Caiuá aquifer and SIAGAS database wells.

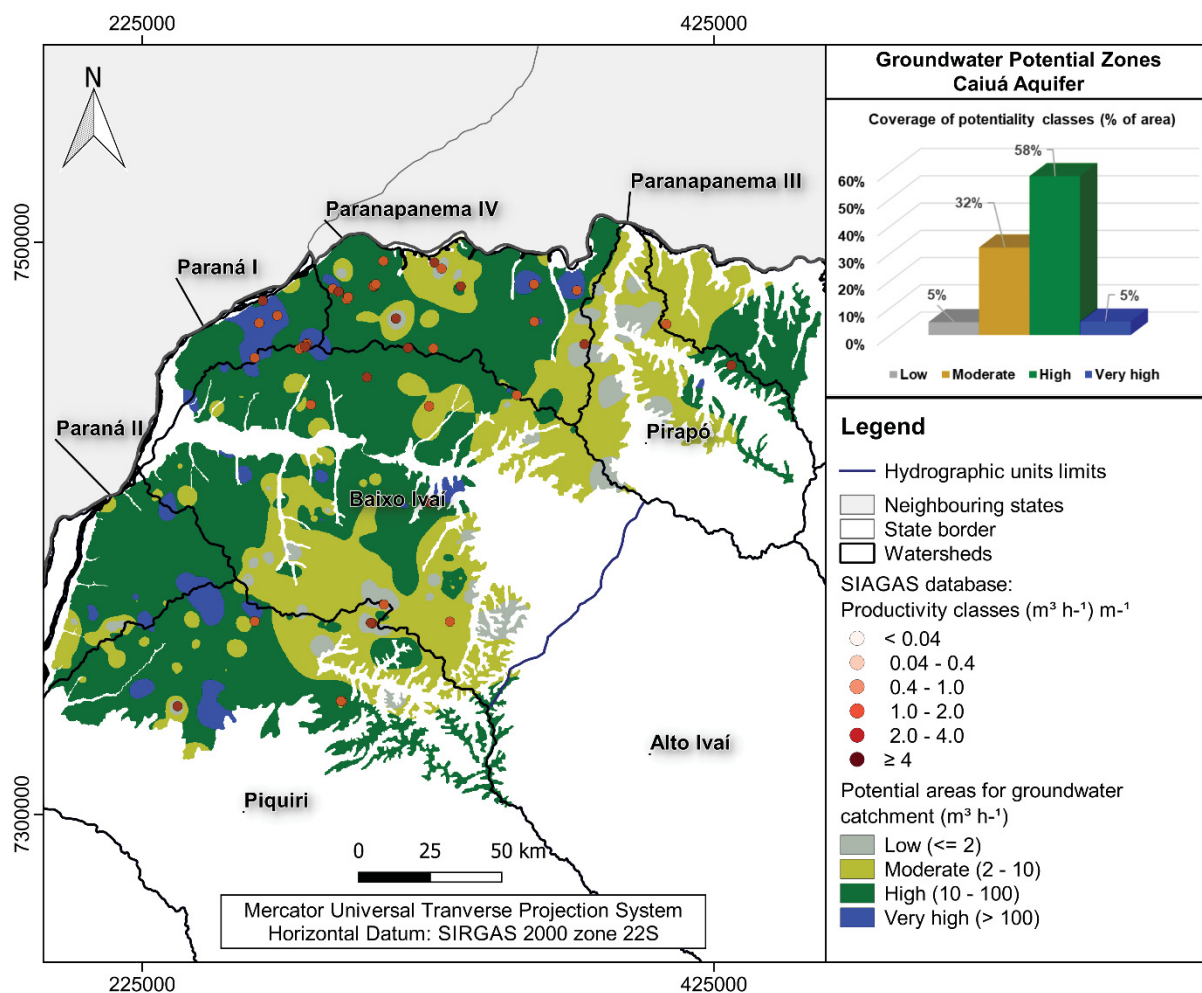


Table B 7 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Caiuá.

(continua)

Percentile	Specific capacity (SIAGAS) ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Specific capacity ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Hydraulic conductivity (m h^{-1})	Saturated thickness (m)	Static level (m)	Transmissivity ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$)	Flow ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Relative risk index (non-dimensional)	Groundwater Potential Zone ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)
25°	0.17	0.17	4.70E-06	26.70	29.00	4.26E-04	2.00	0.69	Low
50°	0.34	0.25	6.58E-06	41.35	35.01	5.36E-04	3.00	0.86	
75°	0.69	0.60	8.82E-06	48.08	41.38	6.48E-04	4.00	0.97	
25°	0.21	0.29	4.13E-06	50.71	21.38	4.18E-04	4.51	0.56	Moderate
50°	0.44	0.47	6.21E-06	64.65	28.96	5.51E-04	6.50	0.82	
75°	0.79	0.69	9.01E-06	74.10	33.24	8.06E-04	10.76	1.00	

Percentile	Specific capacity (SIAGAS) (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹	Specific capacity (m ³ h ⁻¹) m ⁻¹	Hydraulic conductivity (m h ⁻¹)	Saturated thickness (m)	Static level (m)	Transmissivity (m ² h ⁻¹)	Flow (m ³ h ⁻¹)	Relative risk index (non-dimensional)	Groundwater Potential Zone (m ³ h ⁻¹)
25°	0.27	0.44	4.34E-06	81.93	16.88	4.51E-04	10.00	0.40	High
50°	0.48	0.67	6.83E-06	96.53	24.02	6.22E-04	20.97	0.63	
75°	0.93	1.11	1.10E-05	111.11	34.08	1.08E-03	28.12	0.94	
25°	0.35	0.56	7.56E-06	106.20	6.45	6.81E-04	25.25	0.45	Very High
50°	0.66	0.80	1.06E-05	125.41	10.01	1.12E-03	35.47	0.54	
75°	0.98	1.39	1.57E-05	152.65	14.62	1.44E-03	49.65	0.74	

(conclusão)

The Guarani aquifer presented as a predominant class of high potential, occupying an area of 1661 km² and this aquifer outcrop in a region of 1915 km². The regions of very high hydrogeological potential are located in the outcropping north region, as well as the region of lower potential, with the remainder of the outcrop region being predominantly classified as high potential (Figure B5).

When observing the specific capacity values of the SIAGAS database, the highest potential wells are located in the northern region of the outcrop region of the Guarani aquifer (Figure B5). This aquifer occurs in a small strip of outcroppings in the state of Paraná, and the water catchment of this aquifer occurs not only in this region but also in the confinement region by the Serra Geral formation in the west. Thus, it was not possible to compare the wells of the SIAGAS database to all classes defined by the method, but to a single well located in the outcrop region, and it is observed that the specific capacity of this well is of low potential. This well is located in an area of very high potential and it is observed that although the amount of specific capacity and low flow, and an IRR high value, has high values of hydraulic conductivity, transmissivity, and saturated thickness, and has a moderate value of static level, these being what made the potentiality of the area increase (Table B8).

Figure B 5 - Map of groundwater potential areas in the Guarani aquifer and SIAGAS database wells.

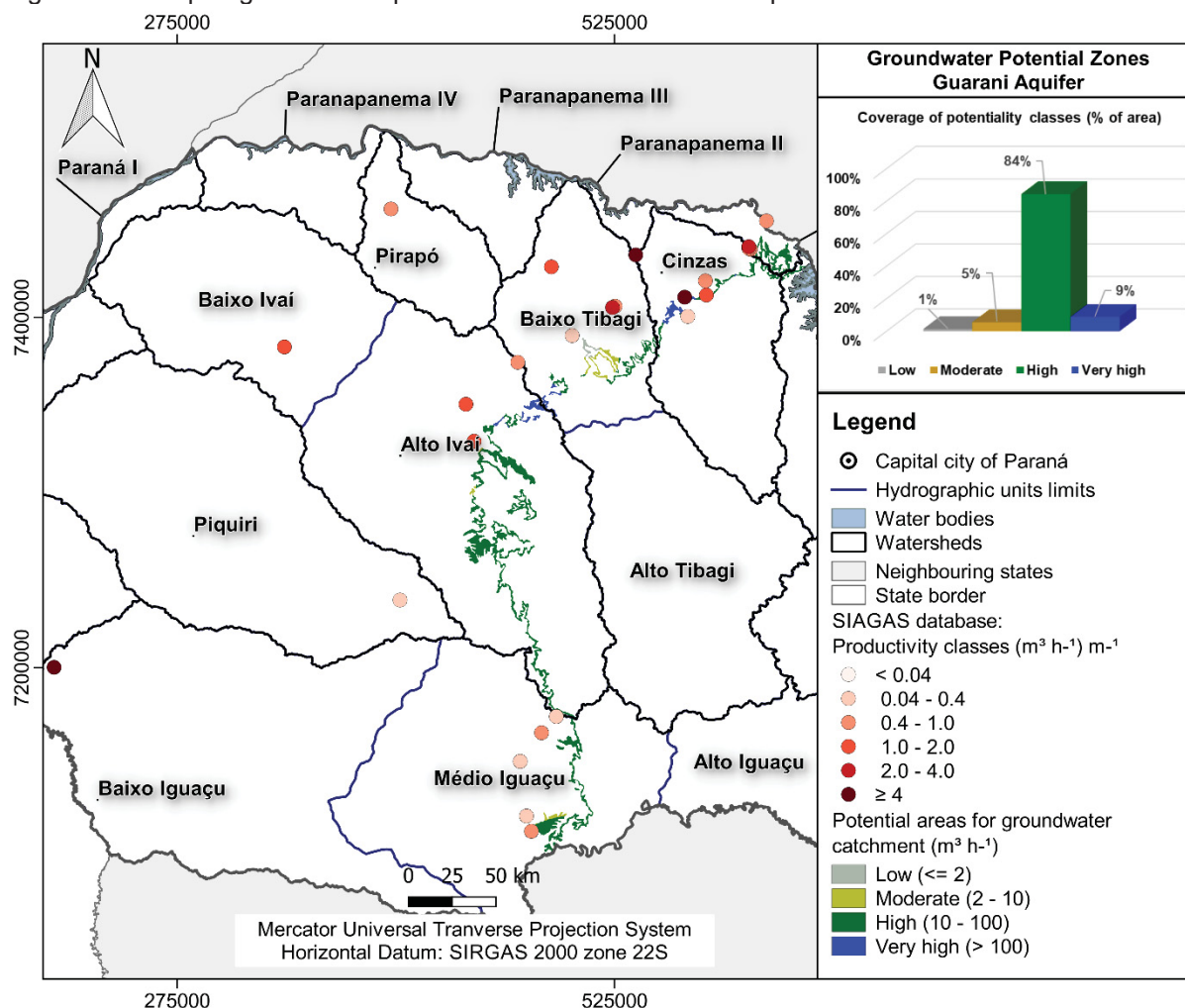


Table B 8 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Guarani.

Percentile	Specific capacity (SIAGAS) ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Specific capacity ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Hydraulic conductivity (m h^{-1})	Saturated thickness (m)	Static level (m)	Transmissivity ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$)	Flow ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Relative risk index (non-dimensional)	Groundwater Potential Zone ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)
25°	-	-	-	-	-	-	-	-	
50°	0.15	0.15	1.36E-04	60.75	18.51	6.30E-03	10.00	0.75	Very High
75°	-	-	-	-	-	-	-	-	

The Passa Dois aquifer presented as the predominant class of high potential, occurring in 7506 km² and this aquifer outcrops in a region of 16944 km² in the state of Paraná. The very high potentiality classes are located at the southern and northern extremes of the outcrop area, with the low to moderate potential classes being located mainly in the central outcrop region (Figure B6).

When the SIAGAS database specific capacity values are observed, the highest potential wells are located in the southern region, and in this database, there

is no occurrence of the very high potential class (Figure B6). It was possible to compare the SIAGAS database wells to high and very high potential classes. The potentiality of the Passa Dois aquifer is related to the higher saturated thicknesses and the low water level for uptake than to hydrodynamics (Table B9).

Figure B 6 - Map of groundwater potential areas in the Passa Dois aquifer and SIAGAS database wells.

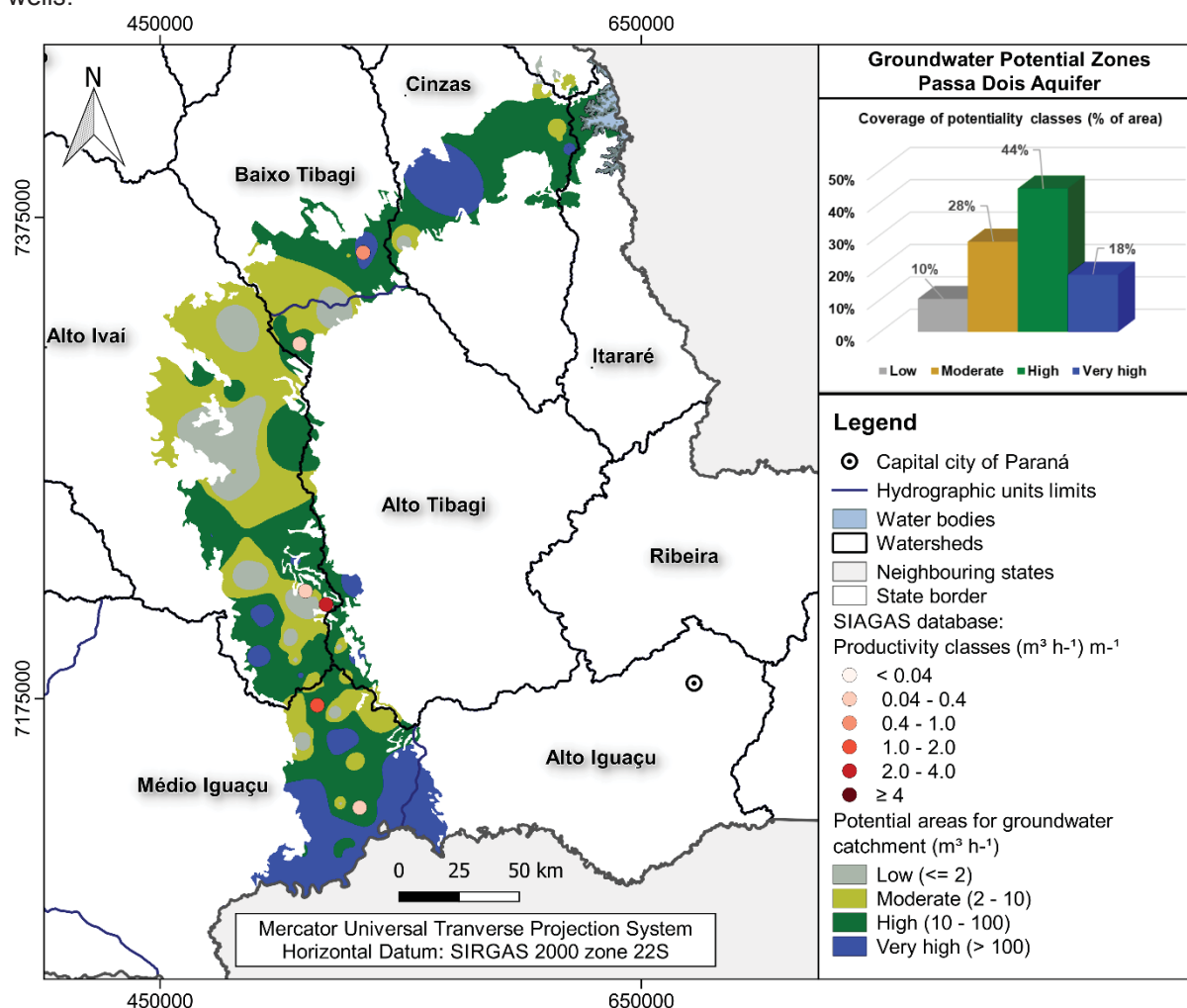


Table B 9 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Passa Dois.

Percentile	Specific capacity (SIAGAS) ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Specific capacity ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Hydraulic conductivity (m h^{-1})	Saturated thickness (m)	Static level (m)	Transmissivity ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$)	Flow ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Relative risk index (non-dimensional)	Groundwater Potential Zone ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)
25°	0.05	0.05	2.94E-07	63.59	1.03	3.79E-05	3.15	1.07	High
50°	0.09	0.09	6.66E-07	98.93	3.60	4.34E-05	4.90	1.07	
75°	3.59	0.09	1.94E-05	196.40	6.51	1.23E-03	5.40	1.13	
25°	0.04	0.04	3.62E-07	90.60	1.03	1.25E-04	4.00	0.78	Very High
50°	0.54	0.54	9.55E-06	120.37	3.62	1.15E-03	7.50	1.07	
75°	1.25	1.25	1.42E-05	345.09	4.87	1.26E-03	26.40	2.07	

The Rio Bonito aquifer presented as the predominant class the high potential, occurring in 1518 km² and this aquifer outcrops in an area of 2569 km² in the state of Paraná. The highest potential classes are in the north and south regions of the aquifer outcrops and the region of lower potential occurs in the central region, although the classes of moderate potential occur close to the regions of very high potential (Figure B7).

When observing the specific capacity values of the SIAGAS database, the highest potential wells are in the northern and southern regions of the aquifer outcrop area (Figure B7). It was possible to compare the SIAGAS database wells to all classes defined by the method. What is observed is that low values of specific capacity, hydraulic conductivity, transmissivity and flow, and high values of static level correlate to the classes of low potential and as the values of specific capacity, hydraulic conductivity, transmissivity, and flow increase, and the static level values decrease, the correlation increases with the higher potential classes. However, the areas with higher potential have a lower saturated thickness and higher toxicological risk according to the IRR (Table B10).

Figure B 7 - Map of groundwater potential areas in the Rio Bonito aquifer and SIAGAS database wells.

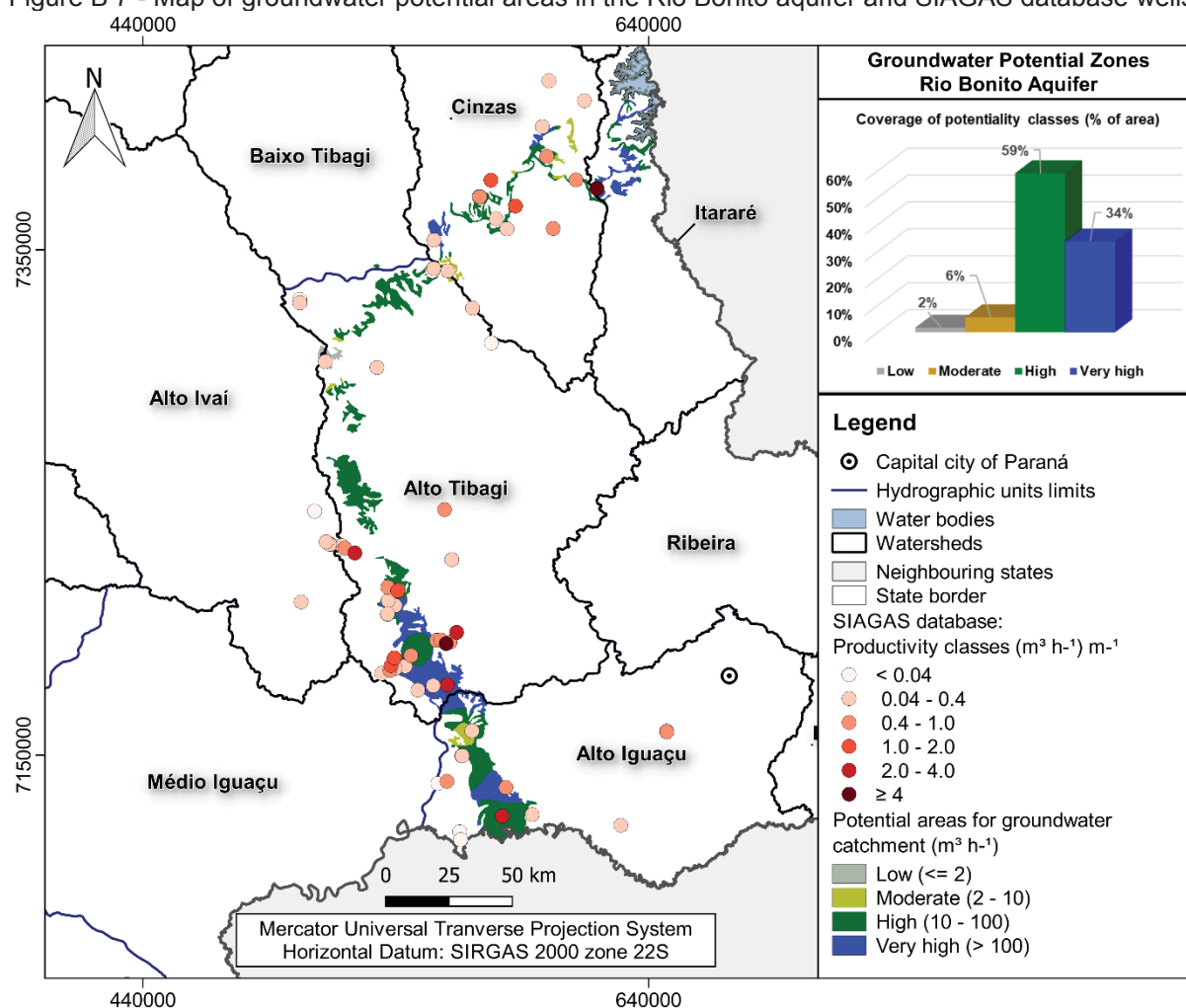


Table B 10 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Rio Bonito.

Percentile	Specific capacity (SIAGAS) ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Specific capacity ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Hydraulic conductivity (m h^{-1})	Saturated thickness (m)	Static level (m)	Transmissivity ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$)	Flow ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Relative risk index (non-dimensional)	Groundwater Potential Zone ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)
25°	-	-	-	-	-	-	-	-	
50°	0.25	0.25	9.50E-07	52.43	27.57	4.98E-05	5.00	1.05	Low
75°	-	-	-	-	-	-	-	-	
25°	0.06	0.24	1.60E-07	46.75	14.00	3.71E-05	4.30	0.34	
50°	0.23	0.24	3.17E-06	46.75	14.00	1.48E-04	6.25	0.39	Moderate
75°	0.24	0.28	3.17E-06	185.71	55.84	1.48E-04	6.25	0.39	
25°	0.12	0.17	1.92E-06	70.95	5.67	1.63E-04	7.41	0.27	
50°	0.49	0.43	4.68E-06	134.36	15.64	6.94E-04	10.02	0.54	High
75°	0.98	1.00	9.28E-06	155.55	28.93	1.30E-03	17.08	0.97	
25°	0.12	0.61	3.82E-06	96.29	5.07	5.30E-04	26.76	0.36	
50°	1.59	0.66	8.93E-06	98.59	5.37	1.12E-03	39.60	0.43	Very High
75°	5.18	3.58	1.61E-05	149.01	7.75	1.74E-03	45.08	1.03	

The Itararé aquifer presented as the predominant class the high potential, occurring in 9665 km² and this aquifer outcrops in an area of 14341 km² in the state of Paraná. The very high potentiality classes are located on the western boundary of the aquifer from north to south of the outcrop region, with a region of highest potential occurring in the southern region (Figure B8).

When observing the specific capacity values of the SIAGAS database, the highest potential wells are located at the northern and southern ends of the aquifer (Figure B8). It was possible to compare SIAGAS database wells to all classes defined by the method and to increase the specific capacity values as the potential of the aquifer increases. Also, low values of specific capacity, hydraulic conductivity, saturated thickness, transmissivity and flow, and high values of static level and relative risk index were correlated to the classes of low potential and as the values of specific capacity, hydraulic conductivity, thickness the correlation increases with the higher potential classes, corroborating with what is expected of the potentiality relationships (Table B7).

Figure B 8 - Map of groundwater potential areas in the Itararé aquifer and SIAGAS database wells.

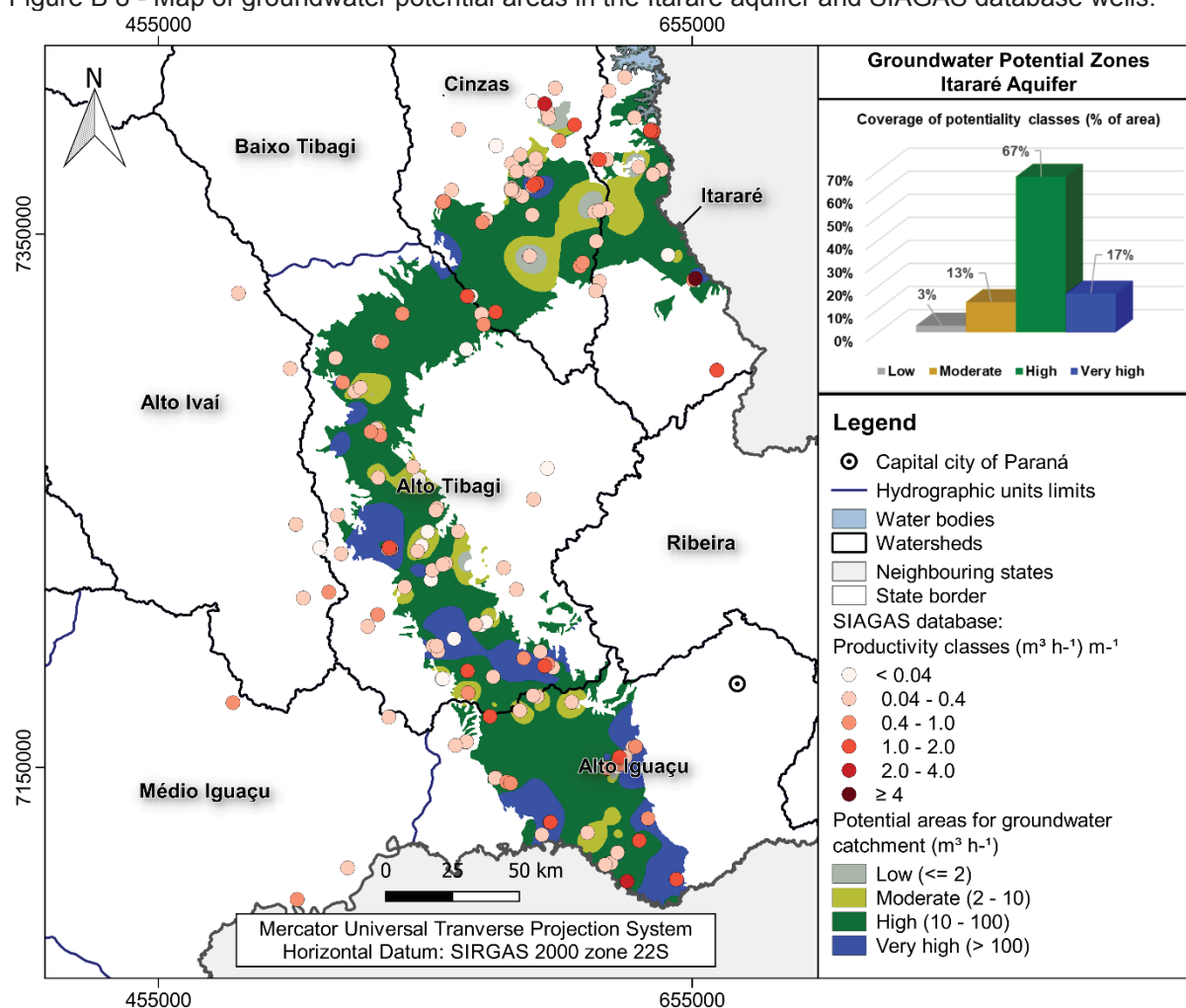


Table B 11 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Itararé.

Percentile	Specific capacity (SIAGAS) ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Specific capacity ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Hydraulic conductivity (m h^{-1})	Saturated thickness (m)	Static level (m)	Transmissivity ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$)	Flow ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Relative risk index (non-dimensional)	Groundwater Potential Zone ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)
25°	0.07	0.02	5.14E-07	34.57	15.91	3.85E-05	0.67	0.49	Low
50°	0.14	0.09	1.18E-06	56.08	26.20	1.29E-04	2.00	0.87	
75°	0.21	0.21	2.73E-06	81.97	51.87	2.69E-04	4.25	1.24	
25°	0.06	0.07	1.56E-06	78.21	18.43	2.15E-04	2.08	0.49	Moderate
50°	0.11	0.12	3.66E-06	113.33	28.99	4.82E-04	3.50	0.73	
75°	0.17	0.17	6.16E-06	134.48	55.66	6.50E-04	6.63	1.13	
25°	0.10	0.14	1.42E-06	94.20	6.03	2.30E-04	6.68	0.42	High
50°	0.21	0.34	2.86E-06	116.20	12.50	3.32E-04	10.00	0.90	
75°	0.57	0.59	4.48E-06	170.18	21.01	6.37E-04	17.82	1.16	
25°	0.28	0.34	2.48E-06	111.34	3.00	3.24E-04	9.08	0.41	Very High
50°	0.56	0.57	4.25E-06	153.49	4.23	5.04E-04	21.99	0.49	
75°	1.35	1.33	1.28E-05	192.41	7.77	1.64E-03	38.21	0.93	

The aquifer Furnas presented as a predominant class the high potential, occurring in an area of 2899 km² and this aquifer outcrops in an area of 4164 km² in the state of Paraná. The very high potentiality classes are located at the southern, central and northern extremes of the outcrop area, and the regions with the lowest potential occur mainly in the northern region of the outcrop aquifer (Figure B9).

When observing the specific capacity values of the SIAGAS database, the highest potential wells are in the region to the south and there are wells with high productivity in the northern region (Figure B9). It was possible to periodically compare the SIAGAS database wells to the moderate, high and very high potential classes defined by the method and to observe higher values of specific capacity for the class of moderate potential, these values being classified as moderate potential to low potential. Also, low values of specific capacity, hydraulic conductivity, saturated thickness, transmissivity and flow, and high values of static level and relative risk index were correlated to the classes of low potential and as the values of specific capacity, hydraulic conductivity, thickness the correlation increases with the higher potential classes, corroborating with what is expected of the potentiality relationships (Table B12).

Figure B 9 - Map of groundwater potential areas in the Furnas aquifer and SIAGAS database wells.

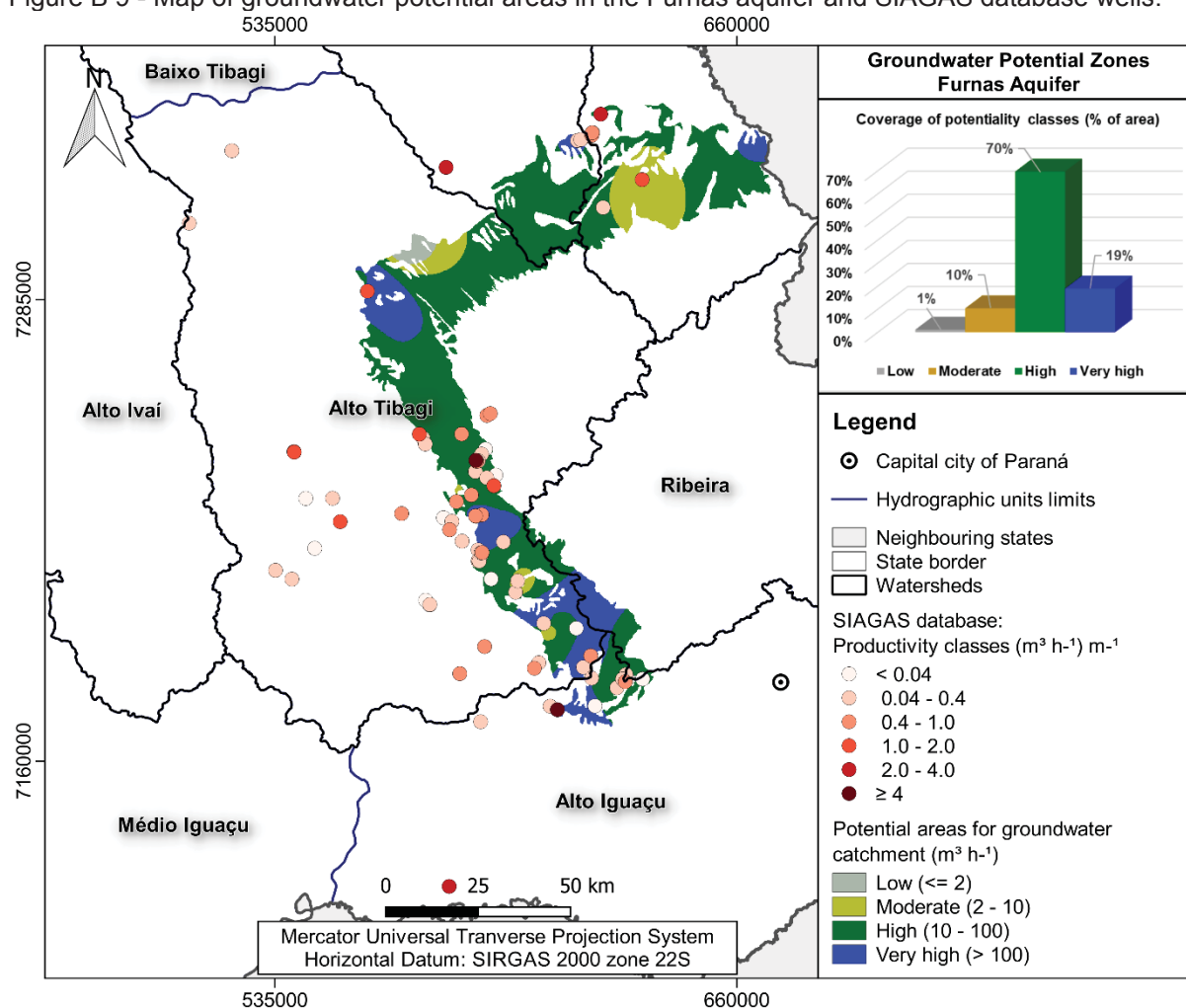


Table B 12 - Table with the specific capacity values of the SIAGAS database and values of the same location of the parameters used for the definition of potential areas, organized by potentiality classes and percentiles, of the aquifer Furnas.

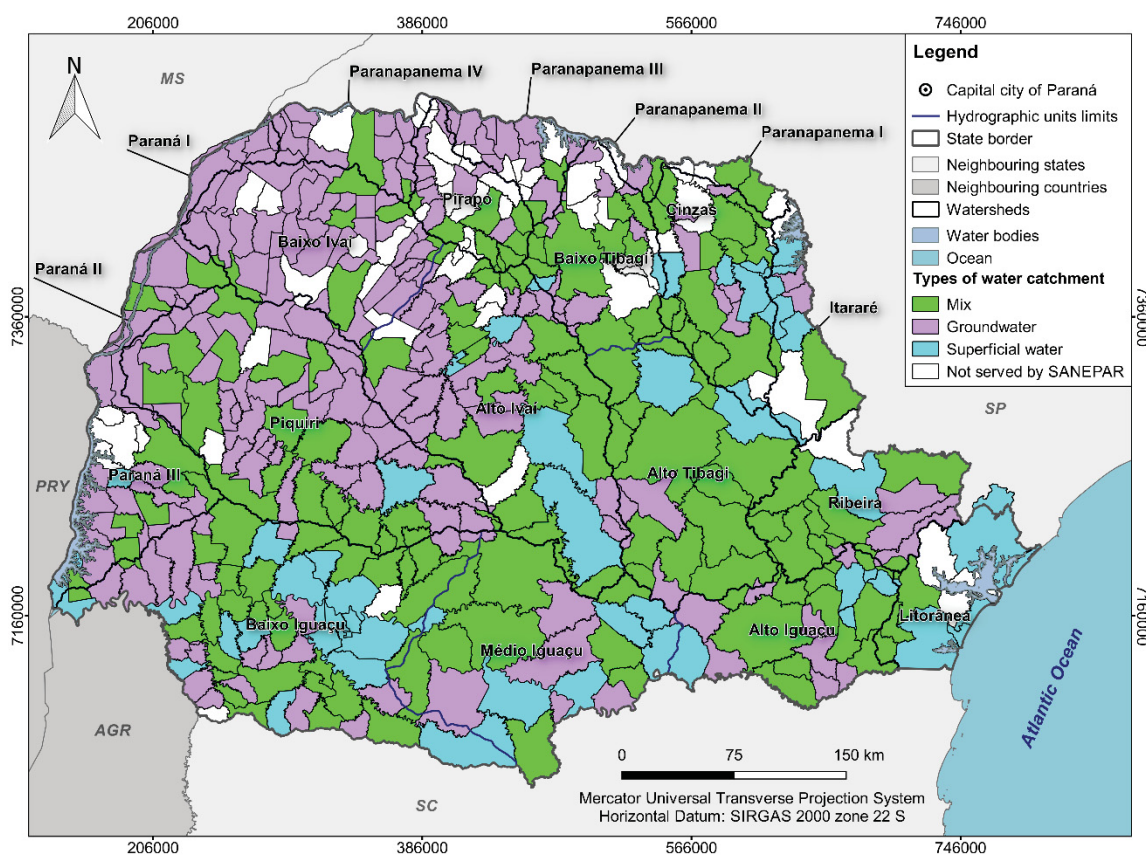
Percentile	Specific capacity (SIAGAS) ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Specific capacity ($\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-1}$)	Hydraulic conductivity (m h^{-1})	Saturated thickness (m)	Static level (m)	Transmissivity ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$)	Flow ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Relative risk index (non-dimensional)	Groundwater Potential Zone ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)
25°	0.02	0.02	4.30E-08	46.43	12.35	3.93E-06	1.00	0.15	Moderate
50°	0.23	1.25	3.64E-06	87.00	45.05	4.96E-04	2.26	0.17	
75°	1.33	1.33	1.58E-05	89.65	66.00	6.70E-04	8.00	0.90	
25°	0.06	0.21	1.39E-06	95.66	11.23	1.11E-04	6.89	0.16	High
50°	0.11	0.28	1.62E-06	116.40	13.34	1.60E-04	7.71	0.49	
75°	0.60	0.40	2.25E-06	123.77	17.78	2.19E-04	9.97	0.49	
25°	0.13	0.41	1.79E-06	93.65	2.45	2.98E-04	7.61	0.13	Very High
50°	0.35	0.90	6.37E-06	109.55	12.49	4.45E-04	19.11	0.14	
75°	0.99	4.84	2.45E-05	219.67	48.71	1.00E-03	57.14	0.18	

The Caiuá aquifer outcrops in the watersheds of the state of Paraná (Figure B3), and in this region the principal type of water catchment for water supply is through groundwater, showing the importance of this aquifer to the area (Figure B10). While the Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, and Guarani aquifers outcrop in the central-eastern watersheds of state (Figure B3) and in this region the type of main water catchment is mixed (superficial and groundwater) (Figure B10). In the Ivaí watershed, the aquifers potentiality is lower (low to moderate) in the Passa Dois (Upper Ivaí) and Caiuá (Baixo Ivaí) aquifers.

The low potential region of the Caiuá aquifer in the Pirapó, Paranapanema III and IV, Piquiri and Ivaí watersheds is related to the high values of IRR in the area, in specific in the hydrographic basin of Baixo Ivaí and Piquiri. While in the other regions the low values coincide with the Goio Erê geological formation, composed by fine to very fine quartz sandstones with frequent pore coating by authigenic clay (smectite), transformed into kaolinite by intemperic processes, besides the common presence of carbonate cementation which locally forms hard nodules and crusts (FERNANDES; COIMBRA, 2000).

There is also a high underground potential of the Itararé and Passa Dois aquifers in the outcrop region of the basin of the Middle and Upper Iguaçu. With the continuity of high potential of the Furnas, Itararé and Rio Bonito aquifers in the Alto Tibagi river basin. The reflection of underground water potential is presented in the Cinzas, Itararé and Alto Ivaí hydrographic basins, where the low potential coincides with mainly surface catchment areas for supply.

Figure B 10 - Map showing the types of water catchment by the municipality and the watersheds in the state of Paraná.



Source: modified from BRASIL (2015).

3.2.5 Conclusions

The GIS and AHP were used to integrate hydrogeological information of sedimentary aquifers in the state of Paraná with the objective of defining potential areas for the catchment of groundwater. The result was six maps with the potential areas of each of the studied aquifers: Furnas, Itararé, Rio Bonito, Passa Dois, Guarani, and Caiuá. Potential areas, defined in four classes, were identified in all aquifers, and for all aquifers, the high potential class is the most representative, exceeding 40% of the outcrop area. This class, other than the very high potential class, indicates that the area is of strong water favorability, however, some parameters have left a class down.

The specific capacity and the flow, although presenting values of lower productivity in zones of very high potential did not interfere in the potentiality of the map. However, when these lower values of productivity were added to values of lower productivity of hydraulic conductivity and transmissivity could change the class from very high to high potential. Moreover, when added to low values of saturated

thickness and high values of static level the class of potentiality went from the high to the moderate potential. The IRR had little interference in general, however, the occurrence of high values had an influence if added to other factors, and the relative risk index had a greater impact on the definition of areas in the Caiuá and Furnas aquifers, where values with indication of high toxicological risk occupied just over 30% of the data compared.

Using hydrogeological parameters to define potential areas, groundwater catchment provides a less subjective method, since variables that directly indicate water favorability are used. The proposed method was satisfactory for a regional scale study and with the obtaining of more hydrogeological information, the definition of the potential areas by the method will be more detailed, including not only wells that are active, but wells that are already inactive or not enough water to be used. The result presented areas favorable to groundwater catchment, but to effectively locate a well, a local study is necessary given the scale of work presented.

The proposed method takes into account the quantity, the catchment capacity and the groundwater quality, being these important factors for the management of this resource. The reflection of groundwater potential is observed when comparing the main types of water catchment per municipality in the state and this result can subsidize studies for watersheds plans in which the aquifers studied outcrop.

3.2.6 Acknowledgments

Thanks The authors thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) for financial support, and Universidade Federal do Paraná (UFPR) and the Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH) for the infrastructure and institutional support to the research.

3.2.7 References

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**: regiões hidrográficas brasileiras. Brasília - DF: ANA, 2014. Relatório Pleno - edição especial.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília - DF: ANA, 2017. Relatório Pleno.

ATHAYDE, C. M.; ATHAYDE, G. B.; LICHT, O. A. B.; ROSA FILHO, E. F. da. Índice Relativo de Risco, ferramenta de tomada de decisão em bacias hidrográficas destinadas ao abastecimento público. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 71, n. 1, p. 21-36, 2014.

AVTAR, R.; SINGH, C. K.; SHASHTRI, S.; SINGH, A.; MUKHERJEE, S. Identification and analysis of groundwater potential zones in Ken–Betwa river linking area using remote sensing and geographic information system. **Geocarto International**, v. 25, n.5, p. 379-396, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Carta das águas subterrâneas do Paraná**: resumo executivo. Brasília: MMA, 2015.

CORSINI, A.; CERVI, F.; RONCHETTI, F. Weight of evidence and artificial neural networks for groundwater potential spring mapping: an application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy). **Geomorphology**, v. 111, p. 79-87, 2009.

FASHAE, O. A.; TIJANI, M. M.; TALABI, A. O.; ADEDEJI, O. I. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach, **Applied Water Science**, v. 4, p. 19-38, 2014.

FERNANDES, L. A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP)**: os grupos Bauru e Caiuá. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 717-728, 2000.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). **Boletim de geociência das Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2/4, p. 147-191, 1988.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ (AGUASPARANA). **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Curitiba: AGUASPARANA, 2010. Relatório executivo.

KUMAR, P.; HERATH, S.; AVTAR, R.; TAKEUCHI, K. Mapping of groundwater potential zones in Killinochi area, Sri Lanka, using GIS and remote sensing techniques. **Sustainable Water Resources Management**, v. 2, p. 419-430, 2016.

MANAP, M. A.; SULAIMAN, W. N. A.; RAMLI, M. F.; PRADHAN, B.; SURIP, N. A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 6, p. 1621-1637, 2013.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G. de; SOUZA, P. A. de; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

OH, H.; KIM, Y.; CHOI, J.; PARK, E; LEE, S. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. **Journal of Hydrology**, v. 399, p. 158-172, 2011.

PINTO, D.; Shrestha, S.; Babel, M. S.; Ninsawat, S. Delineation of groundwater potential zones in the Comoro watershed, Timor Leste using GIS, remote sensing and analytic hierarchy process (AHP) technique. **Applied Water Science**, v. 7, p. 503-519, 2017.

QGIS Development Team: Open Source Geospatial Foundation Project. **QGIS 2.18 "Las Palmas"**. Disponível em: <<https://www.qgis.org/>>.

RIBEIRO, D. D. de M.; ROCHA, W. de J. S. da F.; GARCIA, J. V. Definição de áreas potenciais para ocorrência de água subterrânea na sub-bacia do rio Siriri-Sergipe com o auxílio do método AHP (Método Analítico Hierárquico). In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 16 e 17, 2010, São Luís - MA. **Anais...**

SAATY, T. L. The Analytic Hierachy Process in conflict management. **International Journal of Conflict Management**, v. 1, n. 1, p. 47-68, 1990.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. p. 41-65.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os aquíferos sedimentares do estado do Paraná compreendem distintas formações geológicas que se desenvolveram do Devoniano ao Cretáceo, correspondendo a diferentes ambientes deposicionais e contextos tectônicos. A integração de aquíferos sedimentares com histórias geológicas distintas para definição de áreas potenciais apresentou resultados satisfatórios em que estes puderam ser analisados em um mesmo nível.

Os dados hidrogeológicos possuem uma alta variabilidade de valores em um espaço pequeno de área e com a ocorrência de altos valores próximos a baixos valores, a forma mais adequada de se analisar esses dados é com o uso de percentis. Os percentis mostraram que boa parte dos dados, próximo a 80% em alguns aquíferos, são predominantemente de baixos valores. Essa variabilidade teve reflexo nas interpolações, onde no geral as interpolações tenderam a superestimar valores baixos. Os resultados encontrados sugerem que a presença de valores extremos e a disposição espacial das amostras com grande variação lateral influenciaram as estimativas, sendo o valor dos dados mais próximos os que tiveram maior influência nestes resultados. As superestimativas ocorreram preferencialmente em baixos valores e as subestimativas ocorreram preferencialmente em altos valores, e as variações iguais a zero por cento entre os valores reais e os valores estimados ocorreu com maior frequência quando utilizado o interpolador IDW.

Observando os parâmetros diretamente proporcionais a potencialidade, tais como a capacidade específica, condutividade hidráulica, espessura saturada, transmissividade e vazão, se nota: quando altos valores são subestimados há um otimismo em encontrar áreas que tenham um potencial maior que o esperado, porém, quando baixos valores são superestimados também se cria a expectativa de potencialidades errôneas. Entretanto, observando os parâmetros inversamente proporcionais a potencialidade, tais como o nível estático e o índice relativo de risco, se nota o inverso do que visto com os parâmetros anteriores: quando altos valores são subestimados se cria uma expectativa de bons resultados e quando baixos valores são superestimados se cria uma ideia de áreas ruins de potencialidade.

A escolha do método que gera superfícies mais próximas dos valores medidos refletirá no mapa de áreas potenciais à captação de água subterrânea e quanto mais representativo o mapa, mais condizente serão as zonas de

potencialidade. O método proposto satisfaz a relação de potencialidade em aquíferos sedimentares, com a definição de quatro classes de potencialidade de acordo com os valores obtidos na multiplicação dos mapas temáticos e respectivos pesos atribuídos aos parâmetros. As classes de potencialidade são dadas em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ e definidas em baixo potencial, com valores abaixo de $2 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, moderado potencial, com valores entre 2 e $10 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, alto potencial, com valores entre 10 e $100 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ e muito alto potencial, com valores acima de $100 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$. Dentre os parâmetros aplicados no processo a capacidade específica e a vazão foram os que menos influenciaram na potencialidade, sendo que quando somados a baixos valores de condutividade hidráulica, transmissividade, espessura saturada e vazão, as classes tendiam a menores potencialidades. Já o índice relativo de risco teve maior influência nos aquíferos Caiuá e Itararé.

Estas considerações demonstram a importância que os parâmetros hidrogeológicos têm para a determinação de áreas potenciais à captação de água subterrânea. As ferramentas SIG apresentaram bons resultados quando integradas as análises multicritério, com a apresentação de um método que utiliza informações diretas de potencialidade hídrica. Por ser em escala regional, se faz necessário um melhor detalhamento para certeza em localizar poços, no entanto os resultados mostram locais em que a captação de água seria mais proveitosa e contribui para agilidade no processo de estudos hidrogeológicos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**: regiões hidrográficas brasileiras. Brasília - DF: ANA, 2014. Relatório Pleno - edição especial.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília - DF: ANA, 2017. Relatório Pleno.

ATHAYDE, C. M.; ATHAYDE, G. B.; LICHT, O. A. B.; ROSA FILHO, E. F. da. Índice Relativo de Risco, ferramenta de tomada de decisão em bacias hidrográficas destinadas ao abastecimento público. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 71, n. 1, p. 21-36, 2014.

AVTAR, R.; SINGH, C. K.; SHASHTRI, S.; SINGH, A.; MUKHERJEE, S. Identification and analysis of groundwater potential zones in Ken–Betwa river linking area using remote sensing and geographic information system. **Geocarto International**, v. 25, n.5, p. 379-396, 2010.

AYRES, M.; AYRES JÚNIOR, M.; AYRES, D. L. E SANTOS, A. A. 2007. **BioEstat 5.0**. Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. Belém, PA. 364 p. Disponível em:<<https://www.mamiraua.org.br/downloads/programas/>>"

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Carta das águas subterrâneas do Paraná**: resumo executivo. Brasília: MMA, 2015.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. de C. da; PAULA, T. L. F. de. **Manual de cartografia hidrogeológica**. 1 ed. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014.

FASHAE, O. A.; TIJANI, M. M.; TALABI, A. O.; ADEDEJI, O. I. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach, **Applied Water Science**, v. 4, p. 19-38, 2014.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. (Coord.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FERNANDES, L. A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP)**: os grupos Bauru e Caiuá. Dissertação (Mestrado em Geologia

Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FERNANDES, L. A. Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1 000 000. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n. 55, p. 53-66, 2004.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O Grupo Caiuá (Ks): Revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 3, p. 164-176, 1994.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 717-728, 2000.

FERNANDES, L. A.; RIBEIRO, C. M. M. Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 61, p. 71-90, 2015.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). **Boletim de geociência das Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2/4, p. 147-191, 1988.

FREITAS, M. A. de. Determinação do potencial hidrogeológico de rochas cristalinas através de técnicas de geoprocessamento. In: **Joint World Congress on Groundwater**, 1, 2000.

HELSEL, D.R.; R. M. HIRSCH. Statistical Methods in Water Resources. In: USGS. **Hydrologic Analysis and Interpretation**. U.S. Geological Survey. 522 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ (AGUASPARANA). **Aquífero Guarani**. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/pagina-57.html>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ (AGUASPARANA). **Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas**. Curitiba: AGUASPARANA, 2010b. 144 p. Relatório técnico.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ (AGUASPARANA). **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Curitiba: AGUASPARANA, 2010a. Relatório executivo.

INSTITUTO DE TERRAS E CARTOGRAFIA DO PARANÁ (ITCG). **Bacias Hidrográficas** - estado do Paraná. Paraná: Instituto de Terras e Cartografia do Paraná, 2010.

INSTITUTO DE TERRAS E CARTOGRAFIA DO PARANÁ (ITCG). **Clima** - estado do Paraná. Paraná: Instituto de Terras e Cartografia do Paraná, 2008. Escala: 1:2.000.000.

INSTITUTO DE TERRAS E CARTOGRAFIA DO PARANÁ (ITCG). **Geomorfologia** - estado do Paraná. Paraná: Instituto de Terras e Cartografia do Paraná, 2008. Escala: 1:2.000.000.

INSTITUTO DE TERRAS E CARTOGRAFIA DO PARANÁ (ITCG). **Solos** - estado do Paraná. Paraná: Instituto de Terras e Cartografia do Paraná, 2008. Escala: 1:2.000.000.

INSTITUTO DE TERRAS E CARTOGRAFIA DO PARANÁ (ITCG). **Uso do solo 2001/2002** - estado do Paraná. Paraná: Instituto de Terras e Cartografia do Paraná, 2008. Escala: 1:2.000.000.

KUMAR, P.; HERATH, S.; AVTAR, R.; TAKEUCHI, K. Mapping of groundwater potential zones in Killinochi area, Sri Lanka, using GIS and remote sensing techniques. **Sustainable Water Resources Management**, v. 2, p. 419-430, 2016.

LEE, S.; KIM, Y.; OH, H. Application of a weights-of-evidence method and GIS to regional groundwater productivity potential mapping. **Journal of Environmental Management**, v. 96, p. 91-105, 2012.

MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, n. 62, p. 3-65, 2004.

MANAP, M. A.; SULAIMAN, W. N. A.; RAMLI, M. F.; PRADHAN, B.; SURIP, N. A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the

Upper Langat Basin, Malaysia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 6, p. 1621-1637, 2013.

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e evolução da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. de. **Geologia do continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. Editora Beca: 2004. p. 265-279.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do gondwana sul-ocidental**. 1997. p. 255. Tese (Doutorado em Ciências) - Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 1997.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G. de; SOUZA, P. A. de; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G.; ALMEIDA FILHO, R. **Técnicas de Suporte a Decisão para Modelagem Geográfica por Álgebra de Mapas**. INPE, 2001. p.121. Relatório Técnico.

OH, H.; KIM, Y.; CHOI, J.; PARK, E; LEE, S. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. **Journal of Hydrology**, v. 399. p. 158-172, 2011.

OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná: escala base 1:250.000: modelos reduzidos 1:500.000**. Curitiba: MINEROPAR/UFPR, 2006.

PETRI, S. **Contribuição para ao estudo do Devoniano paranaense**. 1948. p. 126. Tese (Doutorado em Sedimentologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1948.

RIBEIRO, D. D. de M.; ROCHA, W. de J. S. da F.; GARCIA, J. V. Definição de áreas potenciais para ocorrência de água subterrânea na sub-bacia do rio Siriri-Sergipe com o auxílio do método AHP (Método Analítico Hierárquico). In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 16 e 17, 2010, São Luís - MA. **Anais...**

ROSA FILHO, E. F. da; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E.; BITTENCOURT, A. V. L. **As águas subterrâneas no estado do Paraná**. Curitiba, 2010.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. p. 41-65.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Paraná: CPRM, 2015. **Mapa Hidrogeológico do estado do Paraná**. Escala 1:600.000

THILAGAVATHI, N.; SUBRAMANI, T.; SURESH, M.; KARUNANIDHI, D. Mapping of groundwater potential zones in Salem Chalk Hills, Tamil Nadu, India, using remote sensing and GIS techniques. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 4 p. 164, 2015.

TUNDISI, J. G. (Coord.). **Recursos hídricos no Brasil**: problemas, desafios e estratégias para o futuro. 1 ed. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2014.

VIJITH, H. Groundwater potential in the hard rock terrain of western ghats: a case study from Kottayam District, Kerala using resourcesat (IRS-P6) data and GIS techniques. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 35, n. 2, p. 163-171, 2007.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, III, 1987, Curitiba. **Anais...** Curitiba: 1987. p. 441-477

APÊNCIDE A – ACEITE DE PUBLICAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RESUMO EM EVENTO



**XX CONGRESSO BRASILEIRO
DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**
XXI ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS
06 a 08 de Novembro de 2018 | Campinas - SP



**Fenágua
2018**
FEIRA NACIONAL DA ÁGUA

Campinas, 17 de outubro de 2018.

Prezado (a) Autor (a) **PAULA GABRIELA LEAL HERNANDEZ**,

Conforme previamente informado, o trabalho técnico intitulado “**TÉCNICAS DE ESPACIALIZAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS: ESTUDO DE CASO EM AQÜÍFEROS SEDIMENTARES NO ESTADO DO PARANÁ**”, “**CÓDIGO 9714**”, foi **aprovado** para inclusão nos anais e apresentação durante o **XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas** e **XXI Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**.

O trabalho mencionado acima foi aprovado no formato **ORAL** e deverá ser apresentado no dia “**08 de novembro de 2018**”, na Sessão Oral “**SESSÃO ORAL 07**”, arena “**PALCO 2**” no horário das “**13h50 - 14h10**”.

Disponível em: <http://www.abas.org/xxcabas/anais/9714.pdf>